

**MODELACIÓN ESPACIO-TEMPORAL DEL COMPLEJO CENAGOSO DE
AYAPEL-CÓRDOBA USANDO SERIES DE TIEMPO DE IMÁGENES
LANDSAT**



Autores

**JUAN PABLO BUSTAMANTE VERGARA
KATRINTH JOHANNA MERCADO ESPITIA**

**UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA-COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA AMBIENTAL
MONTERÍA-CÓRDOBA**

2020

**MODELACIÓN ESPACIO-TEMPORAL DEL COMPLEJO CENAGOSO DE
AYAPEL-CÓRDOBA USANDO SERIES DE TIEMPO DE IMÁGENES
LANDSAT**



Autores

**JUAN PABLO BUSTAMANTE VERGARA
KATRINTH JOHANNA MERCADO ESPITIA**

Director

DORIS MEJÍA ÁVILA
PhD. Ingeniería Geográfica

*Trabajo de grado presentado en la modalidad de investigación como requisito para
obtener el título de:*

INGENIERO AMBIENTAL

**UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA-COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA AMBIENTAL
MONTERÍA-CÓRDOBA**

2020

**La responsabilidad ética, legal y científica de las ideas, conceptos y resultados del
proyecto, serán responsabilidad de los autores.**

Artículo 61, acuerdo N° 093 del 26 de noviembre de 2002 del consejo superior.

Nota de aceptación

Director(a)

Evaluador(a) Uno

Evaluador(a) Dos

Montería – Córdoba, _____ de _____ del 2020.

DEDICATORIA

A Dios primeramente por permitirme cumplir esta meta.

A mis padres Martha Lucía Espitia Santos, y Cesar Augusto Mercado Nisperuza por acompañarme y apoyarme en este proceso, por ser la causa y razón de mi esfuerzo estos años, por guiarme todos estos años en esta escuela llamada vida y que aún no termina; formándome como persona íntegra que por hoy soy.

A mis hermanos Klarenth S. Mercado Espitia al ser tu modelo a seguir, y Aaron D. Mercado Espitia por ser mi modelo a seguir; por animarme a continuar en todo momento.

A mis compañeros con quienes compartí cada experiencia en estos años de crecimiento profesional, a familiares y demás personas que aportaron su grano de arena para culminar esta etapa de crecimiento profesional y personal

KATRINTH JOHANNA MERCADO ESPITIA

DEDICATORIA

A Dios por permitirme llegar hasta este momento tan importante en mi vida.

A mis padres Nina Luz Vergara Salgado y Miguel Enrique Bustamante Arrieta por ser el motor de mi vida, e impulsarme a ser el joven que soy, lleno del amor de Dios, con valores que desde pequeño me han forjado para mi crecimiento como persona, integra para la sociedad.

A mis hermanos Lina Bustamante Vergara y Juan Esteban Bustamante Vergara, por ser un gran ejemplo hacia ellos.

A Paula Salazar Sotelo, quien llego a mi vida de una manera especial, apoyándome de forma incondicional, siendo un pilar clave en mi proceso de formación académica y personal.

A mis compañeros, amigos y demás personas, que aportaron a este proceso para que hoy por hoy pueda expresar con alegría, lo logré.

JUAN PABLO BUSTAMANTE VERGARA

AGRADECIMIENTOS

Agradecimiento especial a:

A Dios primeramente por permitirnos cumplir cada una de las metas propuestas. A nuestra directora de tesis, la PhD. Doris Mejía Ávila, quien desde un principio creyó en nosotros y nos brindó esta gran oportunidad, por su confianza, dedicación y perseverancia para hoy poder alcanzar este gran logro. A los señores jurados, que por medio de sus evaluaciones nos permitió superarnos en esta etapa. A nuestros padres Martha Lucía Espitia Santos, Nina Luz Vergara Salgado, Miguel Enrique Bustamante Arrieta y Cesar Augusto Mercado Nisperuza por apoyarnos e impulsarnos a ser mejores personas y profesionales en pro de la sociedad y el ambiente.

Agradecimientos:

A nuestros profesores por su entrega en el proceso de enseñanza, por todos y cada uno de los conocimientos impartidos en nosotros, y que con el pasar de los días nos catapultaban a ser las personas integrales que hoy por hoy somos, a la universidad de Córdoba por permitirnos educarnos; a la facultad y el departamento de ambiental por acompañarnos en el proceso. Gracias a nuestros Hermanos Lina Bustamante Vergara, Klarenth S. Mercado Espitia, Juan E. Bustamante Vergara y Aaron D. Mercado Espitia, quienes nos apoyaron en nuestras decisiones contribuyendo enormemente en nuestros logros, al ser un ejemplo a seguir para unos y en seguir para otros. A nuestros compañeros Jesús R., Jesús P., Evis T., María B. M., Paula S. y todos aquellos con quienes compartimos momentos difíciles y gratas experiencias a lo largo de nuestra carrera; con quienes poco a poco y con sacrificio juntos lo lograríamos; A aquellos familiares, amigos y conocidos que formaron parte de esta etapa de crecimiento tan importante en nuestra vida; A todos infinitas Gracias.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN.....	ix
1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. REVISIÓN DE LITERATURA.....	4
2.1. Sistemas de Humedales.....	4
2.1.1. Humedales.....	4
2.1.2. Clasificación de los humedales	4
2.1.3. Función de los humedales	5
2.1.4. Factores generadores de degradación de los humedales.....	6
2.2. Complejo de humedales de Ayapel	7
2.2.1. Servicios ecosistémicos ofertados por la ciénaga de Ayapel.	8
2.3. Niveles digitales	8
2.4. Método de clasificación supervisada	9
2.5. Contraste tierra Agua	9
2.6. Aguas Permanentes.....	10
2.7. Antecedentes	10
3. MATERIALES Y METODOS.....	16
3.1. Tipo de estudio	16
3.2. Área de estudio	16
3.3. Diseño Metodológico.....	17
3.3.1. Revisión de información secundaria.....	18
3.3.2. Selección de imágenes	18
3.3.3. Generación y selección de Imágenes transformadas	24
3.3.4. Obtención de cuerpos de agua en formato Raster para temporadas interanuales e interestacionales.	25
3.3.5. Modelación espacio temporal.....	25
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	27
4.1. Productos Seleccionados.....	27

4.2. Obtención y Selección de Imágenes Transformadas	29
4.2.1. Imagen Transformada Seleccionadas.	31
4.3. Delimitación del Cuerpo de Agua	36
4.4. Modelación Espacio-Temporal	37
4.4.1. Cambio en la capacidad de Recepción de Aguas Permanentes	37
4.4.2. Fragmentación de la ciénaga	40
4.4.3. Capacidad Máxima de Recepción de Agua	44
CONCLUSIÓN	49
RECOMENDACIONES	50
BIBLIOGRAFÍA	51

LISTA DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Mapa de la Ubicación geográfica del sistema cenagoso de Ayapel en el contexto global	16
Ilustración 2. Mapa de la Ubicación geográfica de las estaciones hidrometeorológicas seleccionadas	19
Ilustración 3. Representación de índices y componentes para la Imagen 20 de febrero de 2001.....	30
Ilustración 4. Limite tierra- agua imagen, 23 octubre 1988. Selección de Imagen.....	32
Ilustración 5. Contraste tierra- agua imagen, 5 febrero 2001. Selección de Imagen.	33
Ilustración 6. Diferenciación de Nubes, 23 mayo 1999. Selección de Imagen.	34
Ilustración 7. Identificación de cuerpos Pequeños de agua, 24 enero 1985. Selección de Imagen.....	35
Ilustración 8. Imágenes reclasificadas para la temporada Seca	36
Ilustración 9. Imágenes reclasificadas para la temporada Lluviosa	37
Ilustración 10. Disminución de espejos de agua en el complejo cenagoso de Ayapel. 1985-2018.....	35
Ilustración 11. Modelación espacio temporal para el periodo 1985-2018	37
Ilustración 12. Zona norte de conexión rio San Jorge- ciénaga . Temporada seca	39

Ilustración 13. Localización obras de control, río Cauca. Temporada seca	40
Ilustración 14. Espejos de agua en el complejo cenagoso de Ayapel. Temporada seca	42
Ilustración 15. Capacidad Máxima de Recepción de Aguas permanentes 1988-2017. Temporada Lluviosa.	45
Ilustración 16. Capacidad Máxima de Recepción de Aguas permanente: a) periodo 1988-1999 b) periodo 1999-2011.	47

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Esquema metodológico.	17
Figura2. Estructura para el cálculo de la Radiancia en imágenes TM y ETM.....	21
Figura 3. Estructura para el cálculo de la Reflectancia en imágenes TM, ETM y OLI TIRS.	23
Figura 4. Proceso de modelación de la dinámica espacio temporal del complejo cenagoso de ayapel.....	26

LISTA DE GRAFICOS

Grafico 1. Pluviogramas para los años de selección de imágenes de temporada seca. ..	28
Grafico 2. Pluviogramas para los años de selección de imágenes de temporada lluviosa.	29

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Estaciones Hidrometereológicas seleccionadas para tratamiento de información pluviométrica.....	18
Tabla2. Índices de agua utilizados	24
Tabla 3. Criterios y ponderaciones del proceso de selección de índice de trabajo.....	25
Tabla 4. Valores establecidos para el proceso de reclasificación del Rasters.....	25
Tabla 5. Imágenes seleccionadas	27
Tabla 6. Precipitaciones totales mensuales, imágenes seleccionadas.....	28
Tabla 7. Resultados del método de juicio de expertos.....	31
Tabla 8. Rango de pixel de cubiertas de agua; Fuente: Elaboración Propia.	36
Tabla 9. Métricas de Fragmentación; Fuente: Elaboración Propia.....	40

RESUMEN

Los ecosistemas de humedal son indispensables por los innumerables beneficios o servicios ecosistémicos que brindan a la humanidad, su inclusión como sitios Ramsar conlleva para el gobierno el compromiso de tomar las medidas necesarias para asegurar el mantenimiento de sus características ecológicas; este es el caso del ecosistema cenagoso de Ayapel, localizado en la llanura aluvial del San Jorge. Este ecosistema se encuentra asociado a una problemática en su dinámica hidrológica, debido a procesos de degradación como la pérdida de la capacidad de drenaje, la compactación intensa, disminución del contenido de materia orgánica y procesos de sedimentación del cuerpo de agua que limitan la producción y productividad del sistema. Este estudio se basó en la modelación de la dinámica espacio-temporal del ecosistema cenagoso de Ayapel para un periodo de 33 años, considerando las temporalidades presentadas en la zona (temporada seca y lluviosa), a partir del procesamiento de 6 imágenes provenientes de la galería del satélite de observación terrestre Landsat, con el fin de identificar la imagen que mejor diferenciara los espejos de agua; se evaluó la idoneidad de 7 imágenes transformadas para la delimitación de espejos de agua a saber: índice normalizado de agua (NDWI), el índice normalizado de agua modificado de Xu's (NDWI Xu's), índice de extracción de agua automatizada (AWEI) e índice de diferencia de humedad normalizado (NDMI), y las primeras tres componentes principales de las imágenes. La evaluación de las imágenes transformadas arrojó que la mejor imagen fue el índice NDWI; a partir del cual se determinaron cambios en la superficie del complejo cenagoso para un periodo interanual de 33 años y sus respectivos periodos interestacionales. La temporada seca (1985-2018) arrojó valores de reducción en relación a los valores registrados para el año de 1985 de 41,72 % en sus espejos de agua, con mayor pérdida para el segundo periodo evaluado (2001-2018) y una fragmentación con aumento de 14,6% en número de parches, con reducción de 61,57% en su superficie. Mientras que para la temporada lluviosa (1988-2017) los espejos de agua superaron la superficie inicial en 103,5%, con mayor aumento en el segundo periodo analizado (1999-2017).

Palabras clave: humedales, ciénaga de Ayapel, índices de agua; dinámica espacio temporal.

ABSTRACT

Wetland ecosystems are indispensable for the myriad benefits or ecosystem services they provide to humanity, their inclusion as Ramsar sites entails for the government a commitment to take the necessary measures to ensure the maintenance of their ecological characteristics; this is the case of the sultry ecosystem of Ayapel, located on the alluvial plain of St. George. This ecosystem is associated with a problem in its hydrological dynamics, due to degradation processes such as loss of drainage capacity, intense compaction, decreased organic matter content and water body sedimentation processes that limit system production and productivity. This study was based on the modeling of the space-time dynamics of the dining ecosystem of Ayapel for a period of 33 years, considering the temporalities presented in the area (dry and rainy season), from the processing of 6 images from the Gallery of the Landsat ground observation satellite, in order to identify the image that best differentiates the water mirrors; the suitability of 7 transformed images for the delimitation of water mirrors was evaluated: standardized water index (NDWI), Xu's modified water index (NDWI Xu's), automated water extraction index (AWEI) and standardized moisture difference index (NDMI), and the first three main components of the images. The evaluation of the transformed images showed that the best image was the NDWI index; from which changes were determined in the surface of the complex for a year-on-year period of 33 years and their respective inter-investment periods. The dry season (1985-2018) yielded reduction values relative to the values recorded for the year 1985 of 41.72% in its water mirrors, with the greatest loss for the second period evaluated (2001-2018) and a fragmentation with an increase of 14.6% in number of patches, with a reduction of 61.57% in its surface area. While for the rainy season (1988-2017) the water mirrors exceeded the initial surface area by 103.5%, with the largest increase in the second period analyzed (1999-2017).

Key Words: Wetlands; Ayapel marsh; Water index; Space-time dynamics

1. INTRODUCCIÓN

Existen humedales en las distintas regiones biogeográficas alrededor del mundo. En la actualidad se desconoce el porcentaje exacto de la superficie compuesta por humedales, según estimaciones del centro mundial de monitoreo de la conservación del PNUMA se encuentra en aproximadamente 570 millones hectáreas, es decir, aproximadamente 6% de la superficie de la tierra (Ramsar, 2006). La diversidad hídrica presente en el territorio colombiano garantiza una actividad agrícola altamente productiva, favoreciendo la sostenibilidad del departamento en el cual se desarrolla, de igual forma atañe problemáticas que deterioran el medio natural generando afectaciones a nivel social. Dentro de la variedad hídrica presente en Colombia encontramos los ecosistemas de humedales caracterizados por ser los más productivos debido a la disposición constante de agua en sus terrenos, lo cual favorece el desarrollo de fauna y flora diversa. El 26 % del territorio de Colombia corresponde a humedales (Moreno, 2018), actualmente cuenta con 12 sitios designados como humedales de importancia internacional (sitios Ramsar), equivalente a 1.871.802 hectáreas (Moreno, 2018).

Dentro del territorio colombiano, en el departamento de Córdoba se encuentra ubicado el complejo de humedales de Ayapel, declarado como sitio Ramsar en el año 2018 (Moreno, 2018). Este importante humedal es reconocido en el territorio cordobés por su importancia hidrológica y ecosistémica, en el cual se desarrollan diferentes actividades agropecuarias. Este humedal se encuentra entre los más productivos del país al ser cuna de diversidad biológica, fuentes de agua y productividad primaria de las que innumerables especies vegetales y animales dependen para subsistir; otorgando sustento a altas concentraciones de especies de aves, mamíferos, reptiles, anfibios, peces e invertebrados, e importantes depósitos de material genético vegetal (Ramsar, 2006). Con un área aproximada de 25000 ha y una longitud de 17 km en sentido norte-sur, la ciénaga de Ayapel se localiza en la parte suroccidental de la Depresión Momposina y colinda por el norte con la subregión de la Mojana, con la cual se articula tanto en lo físico y económico. Sus alrededores están constituidos por zonas planas inundables y algunas colinas de escasa altura (Díaz, 2009). En el sistema de humedales de Ayapel existen prácticas y actividades de tipo minero y agropecuario que influyen en el deterioro de este importante ecosistema. Procesos de degradación como la pérdida de la capacidad de drenaje, la compactación intensa,

disminución del contenido de materia orgánica, son factores que limitan la producción y productividad de los suelos en la zona; mientras que la presencia de procesos de contaminación asociados al uso de agroquímicos, disposición inadecuada de residuos líquidos y sólidos; y el aumento de los procesos de sedimentación del cuerpo de agua, están asociados a la pérdida de las propiedades y reducción del recurso hídrico (Díaz, 2009).

La declaratoria otorgada en el año 2018 para el mes de febrero como sitio Ramsar (MADS, 2018) ofrece un marco para la conservación y el uso racional del humedal y sus recursos mediante acciones locales (Romero, 2016). El cumplimiento de lo establecido en el convenio debe estar a cargo de las corporaciones; por lo tanto, para el área del complejo de humedales de Ayapel la identificación de los posibles cambios a través del tiempo y su respectivo análisis pueden ser aprovechados para orientar programas en el manejo y restauración de posibles deterioros a los cuales ya haya sido sometido el área protegida; dentro de la temática de seguimiento y manejo de recursos naturales a partir de técnicas geoespaciales aplicadas a recursos hídricos.

Los humedales actualmente considerados como áreas de especial conservación por los múltiples beneficios que proporcionan al ambiente y el ser humano, requieren una gestión encaminada al aprovechamiento sostenible de sus recursos y mitigación de procesos de deterioro. El uso de alternativas mediante las cuales se identifiquen dichas problemáticas y sus posibles causas sugieren monitoreos diseñados para detectar cambios en los humedales; estas deben implementarse atendiendo a las escalas espacio-temporales y considerando factores naturales y antrópicos que influyen en los niveles de agua, lo que permite distinguir la dirección del cambio en la variación natural (Vidal et al., 2013).

El objetivo general de la presente investigación es modelar la dinámica espacio-temporal del complejo cenagoso de Ayapel para un periodo de 33 años (1985-2018) a partir del uso de series de tiempo de la galería de imágenes Landsat. Para el desarrollo de este objetivo se plantearon los siguientes objetivos específicos: a) comparar diferentes métodos de cartografiado de agua: uso de bandas de componentes principales e índices de agua a partir de bandas originales. Y b) modelar la dinámica espacio-temporal del complejo a partir de métricas de fragmentación de hábitat.

El procesado se llevó a cabo con 6 imágenes provenientes de la galería del satélite de observación terrestre Landsat, con el fin de identificar la imagen que mejor diferenciara los espejos de agua; se evaluó la idoneidad de las imágenes transformadas a partir de la original. Para la delimitación de espejos de agua se aplicó: el índice de diferencia normalizado de agua (NDWI), el índice de diferencia normalizado de agua modificado de Xu's (NDWI Xu's), el índice de extracción de agua automatizada (AWEI) y el índice de diferencia de humedad normalizado (NDMI) y las primeras tres componentes principales de las imágenes. La evaluación de las imágenes transformadas arrojó que la mejor imagen transformada fue el índice NDWI; a partir del cual se determinaron cambios en la superficie del complejo en sus periodos interanuales e interestacionales respectivamente. Para la temporada seca la obtención de los valores reflejaría la disminución del humedal a lo largo de los años y el proceso de fragmentación al cual ha sido sometido, identificando las posibles causas en el proceso de cambio a lo largo de la época evaluada. Mientras que para la temporada lluviosa se obtendrían valores demostrativos del crecimiento en la superficie de parches de agua que conforman el humedal en los tres periodos interanuales considerados para desarrollo del estudio.

2. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Sistemas de humedales

2.1.1. Humedales

Según la cuarta edición del manual de la convención Ramsar, los humedales son referidos como “zonas donde el agua es el principal factor controlador del medio y la vida vegetal y animal asociada a él. Los humedales se dan donde la capa freática se halla en la superficie terrestre o cerca de ella o donde la tierra está cubierta por aguas poco profundas”. (Ramsar, 2006),

Las múltiples funciones de los ecosistemas de humedales y su valor para la humanidad se han llegado a comprender y documentar en grado creciente a lo largo de los años. Esto se ha traducido en gastos ingentes para restablecer las funciones hidrológicas y biológicas de humedales degradados o interrumpidos (Ramsar, 2006). Los humedales pueden pasar gradualmente a lagos y ríos, pueden ser estacionales o incluso desarrollarse completamente durante y después de años húmedos. El grado de fluctuación es algo importante para las características de los humedales, y puede variar dentro de los mismos. (Custodio, 2001).

Sus funciones como reguladores hidrológicos son importantes para el balance hídrico de una zona de cuencas hidrográficas o de captación. Estos varían dentro de un mismo país debido a los cambios en las condiciones geográficas, pero afectan así mismo a esas condiciones, reportando incluso beneficios climáticos a pequeña y gran escala (Bacon, 2016). La capacidad de adaptarse a condiciones dinámicas e índices de cambio cada vez más rápidos será crucial para las comunidades humanas y las especies silvestres conforme se vaya percibiendo de lleno el impacto del cambio climático en las bases de sustentación de los ecosistemas (Ramsar, 2006).

2.1.2. Clasificación de los humedales

Los humedales al ser zonas donde el agua es el factor fundamental que controla el medio ambiente, la vida vegetal y animal que de ella depende, exhiben características que hacen compleja la categorización de los humedales ya existentes (Bacon, 2016). Sin embargo, la convención Ramsar aplica un criterio amplio a la hora de determinar que humedales se

encuentran sujetos a sus disposiciones, reconociendo seis tipos de humedales principales: marinos, estuarinos, lacustres, ribereños, palustres y artificiales (Ramsar, 2006). No obstante, la convención ha optado por un sistema de clasificación en el cual se incluyen 42 tipos de humedales agrupados en tres categorías: humedales marinos y costeros, humedales continentales y humedales artificiales. (Ramsar, 2006)

2.1.3. Función de los humedales

La interacción entre los componentes físicos, biológicos y químicos de los humedales les permite desempeñar determinadas funciones. Las cuales son importantes para el balance hídrico de una zona de cuencas hidrográficas o de captación. (Bacon, 2016)

Las funciones pueden estar asociadas al almacenamiento de agua, protección contra tormentas, mitigación de crecidas, estabilización de costas, control de erosión, recarga y descarga de acuíferos, depuración de aguas, estabilización de condiciones climáticas locales como la lluvia y temperatura, entre otros. Estas pueden mantenerse si se permite que los procesos ecológicos de los humedales sigan funcionando naturalmente. Sin embargo, estos sistemas figuran como los ecosistemas más amenazados del mundo, a causa de la continua desecación, conversión, contaminación y sobreexplotación de sus recursos. (Ramsar, 2006)

Una fuente de enriquecimiento es la transferencia de materia orgánica y nutrientes, que explica en parte la alta productividad de estas zonas, su transporte se llevaba cabo por medio de corrientes de marea, aguas subterráneas, atmósfera, drenes, entre otros, constituyendo vectores abióticos. Sin embargo, el pastoreo intensivo modifica indirectamente los procesos microbiológicos del suelo, lo que afecta el ciclo del nitrógeno y el carbono, al disminuir la potencialidad de la materia orgánica y las exportaciones de nutrientes por vectores físicos. Aunque los flujos pueden ser significativos, la transferencia de materia orgánica también se ve facilitada por la migración trófica de la fauna acuática, como las comunidades de peces, que constituyen vectores biológicos o bióticos en el sistema (Lefeuvre et al., 2003).

Las contribuciones fluviales por parte de estas zonas, como el control de las inundaciones provenientes de la parte superior o aportes de afluentes que quedan retenidos y separados por diques naturales con ríos principales abastecidos por corrientes o drenes de agua

superficial y subterránea, son igualmente importantes como la fauna y flora que alberga, aunque con características que los hacen diferentes. Estos ecosistemas no solo son los más productivos de la tierra, sino que además juegan un papel fundamental en la supervivencia de especies vegetales y animales. (Custodio, 2001)

2.1.4. Factores generadores de degradación de los humedales

Los humedales integrados por atributos que definen la identidad ecológica como el clima, geomorfología, hidrología, biota y el componente social, relacionados a aspectos ecológicos como: el volumen, la circulación del agua dentro del humedal y el hidroperíodo; favorecen la calidad del agua y los rangos propios de temperatura manteniendo de manera balanceada los atributos ecológicos y sociales que dan cuenta de la funcionalidad de los humedales como objetivo crítico para conservar la capacidad de respuesta ante fenómenos de cambio climático. (Vidal et al., 2013)

La estructura hidroclimatogénica para los humedales es vital, dado que combina regímenes y flujos hídricos abundantes o recurrentes, ante la presencia de sustratos, que aseguran la ocurrencia de los procesos físicos, químicos y biológicos; los cuales subordinados al ciclo hidroclimático de energía y materia en la zona garantiza su funcionamiento e interacción continua en el sistema, proporcionando su auto sostenimiento y regulación. (Martínez et al., 2014)

La presencia de actividades de origen antrópico, encaminadas al sostenimiento de la población en función de su crecimiento, son un factor determinante en los procesos de degradación. El uso principal del suelo se centra en la preservación y restauración, restringiendo la práctica del turismo, ecoturismo, rondas forestales, urbano, agroindustrial o agrícola en el desarrollo en estas zonas; sin embargo, las actividades llevadas a cabo en el complejo cenagoso de Ayapel se basa en la agricultura, la pesca, ganadería y minería (Caribe & CVS, 2015)

La explotación intensiva de ecosistemas naturales de cobertura boscosa en el proceso de deforestación en los últimos años ha provocado cambios evidentes en la cobertura de los sistemas de humedal. La práctica de esta actividad potencia procesos de sedimentación y colmatación de fuentes hídricas en las áreas donde se desarrolla, ante la pérdida del sostén

de las raíces en el suelo (Díaz, 2009). La minería una de las actividades de mayor influencia en el proceso de pérdida de las capacidades de estos sistemas al afectar de forma amplia los factores bióticos y abióticos que lo conforman, como la intercepción de cuencas tributantes, procesos de sedimentación, entre otros. (C. D. I. A. CVS, 1990)

2.2. Complejo de humedales de Ayapel

El sistema de humedales de Ayapel localizado en la margen izquierda del río San Jorge cuenta con una extensión de aproximadamente 17400 km² (Omacha & CVS, 2011). La cuenca de la ciénaga tiene un área de 1504 km² aproximadamente, situada entre los 20 y 150 m.s.n.m. ubicándose en la zona de bosque húmedo tropical con temperaturas entre los 26 y 29°C (Montoya M & Aguirre R, 2009). El cuerpo de agua más grande se localiza en inmediación de la cabecera municipal de Ayapel, el sistema incluye varios humedales menores y zonas de zápales conectados a través de una compleja red de caños. (ANP & CVS, 2010)

Este importante complejo es considerado un acuífero y reservorio íctico relevante perteneciente a la llanura aluvial del río San Jorge; presenta un ambiente de humedal permanente y poco profundo (UDEA, 2015). Pertenece a un sistema hidrológico independiente, que recoge las precipitaciones de las cuencas de las quebradas y los caños que le desembocan por los costados oriental y sur. Este sistema entrega sus excedentes al río San Jorge por el caño Grande y mantiene la regulación de sus aguas con la de otros caños y ciénagas menores en periodos de alta precipitación.

La ciénaga de Ayapel cumple el papel de receptor y de cuerpo de almacenamiento cuando se presentan los desbordamientos del río Cauca, considerándose como una importante área de control de inundaciones. Este cuerpo cenagoso es relativamente superficial, en épocas de sequía presenta profundidades de 50 a 80 centímetros en las partes de menor nivel de aguas bajas y de 2 a 3 metros en las partes más profundas del mismo, mientras que para las épocas de alta pluviosidad la profundidad oscila entre 5 y 8 metros encontrándose en el sector próximo a la cabecera municipal y a lo largo de los caños principales; por tanto, este cuerpo de agua de interés ambiental y social presenta un nivel mínimo para los meses de marzo y abril suponiendo que las lluvias para estos meses sean mínimas, y alcanza su

máximo nivel entre agosto y septiembre asumiendo altas precipitaciones en la zona. (Díaz, 2011)

Hidrogeológicamente, el complejo se encuentra relacionado con la formación Betulia, la cual se comporta como un acuitardo, al poder almacenar cantidades apreciables de agua subterránea con transmisión leve debido a la composición de los suelos en la zona, con presencia de alto contenido de arcillolitas; el cual brinda propiedades impermeables; mientras que los depósitos de origen aluvial se comportan como un acuífero libre de extensión regional ya que permite la circulación del agua por sus poros o grietas de almacenamiento y transmisión del agua subterránea.(C. D. I. A. CVS & Consultores, 2007).

2.2.1. Servicios ecosistémicos ofertados por la ciénaga de Ayapel.

El ecosistema de humedales de Ayapel resulta ser determinante en la calidad de vida de las comunidades, dado que el recurso ha sido base del sustento de aquellas situadas en su área de influencia. Además de su esencia ambiental, tienen un valor económico ya que sus recursos naturales suministran alimentos y su paisaje es atractivo para los amantes del turismo ecológico, la pesca, los deportes náuticos y la natación. Adicionalmente, la historia, las tradiciones culturales y la gastronomía pueden ser productos turísticos culturales que no han sido aún explotados.(Díaz, 2009)

Los sistemas hídricos de la ciénaga también cumplen una función ambiental importante al regular los regímenes hidrológicos de las áreas tributarias de los ríos San Jorge y Cauca, y de varios caños y quebradas que vierten sus caudales sobre ella. Alberga una gran variedad de especies de flora y fauna; brinda refugio, alimento y protección a especies migratorias de peces y aves; y posee una belleza paisajística. El contenido de macrófitas es un importante componente ecológico, debido a que proveen hábitat a invertebrados, peces y gran diversidad de otros organismos.(Díaz, 2009)

2.3. Niveles digitales

En el proceso de adquisición de una imagen la energía procedente de los objetos se registra sobre una superficie sensible a la luz, componiéndose de una o varias capas formando una película pancromática o en color. Es decir, el sensor detecta la Radiancia media de una

parcela del terreno equivalente al tamaño del pixel, unidad visual más pequeña que conforma la imagen, este valor medio se traduce por el sensor a un valor numérico a partir del cual se realiza el tratamiento digital de imágenes. Cada pixel de la imagen viene definido por un número entero, traducción de la Radiancia recibida por el sensor para una determinada parcela de la superficie terrestre y en una determinada banda del espectro. Por tanto, al componerse las imágenes por varios números de pixeles, los valores numéricos asociados a una misma superficie se denominan niveles digitales (ND). (Reuter, 2008)

2.4. Método de clasificación supervisada

La clasificación supervisada permite clasificar rásters por medio de cada píxel de una celda, es necesario tener conocimiento previo de las clases del área de estudio (uso actual del suelo); se debe marcar puntos y asignar un valor numérico para cada clase (Franzpc, 2012). Este tipo de clasificación cuenta con un conocimiento a priori, es decir, para la tarea de clasificar un objeto dentro de una categoría o clase, contamos con modelos ya clasificados (objetos agrupados que tienen características comunes). Se pueden diferenciar dos fases: la primera permite construir un modelo o regla general para la clasificación, y la segunda consiste en clasificar los objetos o muestras de las que se desconoce la clase a la que pertenecen, y caracterizarse en función del conjunto de variables mediante la medición de las mismas en individuos cuya pertenencia a una de las clases no presente dudas. (Araujo, 2006)

2.5. Contraste tierra-agua

El contraste se refiere al efecto producido al destacar un elemento visual en comparación con otro en una misma imagen. Este efecto puede darse por la combinación de diferentes colores, tamaño, textura o elementos visuales. También, se define como la diferencia entre el tono más negro y más blanco que conforman una imagen. Por tanto, entre mayor sea la distancia en una imagen entre el tono más oscuro y claro, mayor será el contraste (C. Rodríguez, 2018).

En el proceso de mediciones automáticas espaciales, el realce temático, tales como tramos de contraste lineal, racionamiento de bandas, correcciones geométricas y atmosféricas, el

realce de los bordes permiten obtener una máxima versatilidad en el procesamiento de escenas y un aprovechamiento potencial de los sistemas de información geográfico. (USAID, 1993)

2.6. Aguas permanentes

Los cuerpos de agua dulce como los humedales se denominan áreas que permanecen en condiciones de inundación o, por lo menos, con suelo saturado de agua durante largos períodos de tiempo (M. V. Rodríguez, 2016). Suelen ubicarse en regiones alejadas de las zonas costeras, dando lugar a formaciones interiores de agua. La presencia de dichas aguas está condicionada a las propiedades y condiciones de fenómenos como las inundaciones, las lluvias, nevadas y desborde de ríos o subidas del nivel del mar, ya que estos fenómenos son los responsables de suministrar un volumen determinado de agua a las zonas de almacenamiento. Las aguas permanentes son aquellas que se mantienen sin interrupción o cambio en un mismo lugar, estado o situación. (Roldán, 2019)

2.7. Antecedentes

El desarrollo de procesos de investigación y monitoreo de los humedales resulta ser de gran importancia para tener bases debidamente sustentadas a la hora de determinar impactos ambientales y problemáticas que afecten la dinámica de los humedales. En la actualidad en el proceso de monitoreo y gestión, la implementación de técnicas geoespaciales se ha convertido en una alternativa de uso actual para llevar a cabo la toma de decisiones con respecto a proyectos o cambios que conciernan al área de interés ambiental. (Henao, 2015)

La existencia de proyectos en los cuales se involucra la aplicación de SIG en beneficio de la gestión y monitoreo de recursos hídricos es amplia. En el estudio titulado “Spatio-Temporal Modelling Of Wetland Ecosystems Using Landsat Time Series: Case Of The Bajo Sinú Wetlands Complex (BSWC)– Córdoba– Colombia” (Ávila et al., 2019), el proceso llevado a cabo se centró en realizar un modelado espacio temporal de ecosistemas de humedales usando series de tiempo Landsat a partir de la aplicación de índices de agua, para cuantificar el impacto causado por las actividades antrópicas en los humedales. Los resultados arrojaron cambios en el área del complejo de humedales del bajo Sinú;

permitiendo observar una disminución en la capacidad máxima de almacenamiento de agua. Durante el proceso de modelado se concluyó luego de una serie de pruebas que el índice de agua más adecuado para desarrollo del proyecto fue el índice de agua de diferencia normalizada (NDWI), al arrojar el menor porcentaje de error (Ávila et al., 2019). El desarrollo de este proyecto es considerado base en el modelado espacio temporal para el complejo de humedal de Ayapel, dado los recursos con los cuales se sustenta.

Otro estudio destacado es el llevado a cabo en Tanzania, África oriental; titulado “Dynamics of Usangu Plains Wetlands: Use of Remote Sensing And GIS As Management Decision Tools” realizado por Kashaigili; Mbilinyi; Mccartneyn y Mwanuzi en el año 2006; basado en la implementación y uso de imágenes Landsat-MSS y Landsat-TM; con el objetivo de ubicar y cuantificar los cambios a largo plazo y estacionales producidos como resultado de actividades humanas y del desarrollo en el área, revelando un aumento en el área cubierta por un pantano con vegetación entre los años 1973 y 1984, y una disminución en el área de cubierta boscosa; también reveló las diferencias en la resolución espacial y como estas podrían perjudicar la detección del cambio en los procesos de investigación llevados a cabo por medio de imágenes satelitales (Kashaigili et al., 2006).

Por otra parte, en Samaspur, Uttar Pradesh en India, un estudio denominado “Wetland Monitoring, Serving as an Index of Land Use Change-A Study in Samaspur Wetlands, Uttar Pradesh, India” se optó estudiar la dinámica de los humedales como índice de cambio en el uso del suelo. El estudio realizado por M. D Behera; V. S. Chitale; A. Shaw; P. S. Roy y M. S. R. Murthy en 2012. Se llevó a cabo a partir del proceso de teledetección satelital para comprender la dinámica periódica y estacional de los humedales de Samaspur utilizando los datos temporales Landsat y Resourcesat. La clasificación de estas áreas de importancia ambiental fue realizada en base al índice de agua de diferencia normalizada (NDWI) y el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI); estableciendo una discriminación significativa de las clases de humedales en el área. Los resultados obtenidos indican que las áreas de dispersión de agua ha aumentado a su capacidad óptima y la influencia de expansión del área agrícola a llevando a la reducción del área de amortiguación de los humedales.(Behera et al., 2012).

En el proyecto llevado a cabo en china en la cuenca del río Yangtzé por parte de Wenbo Li, Zhiqiang Du, Feng Ling, Dongbo Zhou, Hailei Wang, Yuanmiao Gui, Bingyu Sun y Xiaoming Zhang para el año 2013, se basó en la comparación de modelos NDWI implementados en imágenes TM y ETM provenientes del sensor ALI, para la evaluación del desempeño de los datos en la cartografía de límites de superficie de agua en puntos estratégicos del río Yangtzé. Los resultados obtenidos establecieron cinco modelos de NDWI para el sensor ALI con aplicabilidad de índices en base a los datos TM y ETM+; resultados favorables que no descartan un mapeo de aguas superficiales. Por tanto, el proceso y tratamiento de los datos de productos TM y ETM llevados a cabo en la cuenca del río Yangtzé puede ser aplicable para productos del satélite Landsat (Li et al., 2013).

Autores como Londoño y Ramírez, en su estudio “Cambios espacio-temporales del plancton en la ciénaga de Ayapel (Córdoba-Colombia), durante la época de menor nivel del agua” realizado en el año 2012, expone el modelamiento de cambios espacio-temporales de la vegetación en la ciénaga mediante datos pluviográficos. El procesamiento llevado a cabo estableció la identificación de diferentes comunidades acuáticas que dependen de las condiciones hidrológicas, ambientales y de las complejas relaciones dentro y entre los ensambles fitoplanctónicos y zooplanctónicos que se llevan a cabo en la ciénaga con sus alrededores; los resultados arrojaron una variabilidad en el contenido de vegetación de la ciénaga, por tanto un deterioro en la capacidad del sistema (Londoño & Ramírez, 2012).

En el caso de Yan Gao; Zeyu Liang; Biao Wang; Yanlan Wu; Penghai Wu en su estudio “Wetland Change Detection Using Cross-Fused-Based and Normalized Difference Index Analysis on Multitemporal Landsat 8 Oli” del año 2018, cuantificó el cambio de cobertura de humedales mediante un método de detección de cambio de comparación de imagen a imagen basado en la fusión de imágenes multitemporales, permitiendo apreciar una variabilidad en cuanto al área del humedal. La aplicación de índices como el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) y el índice de diferencia de agua normalizada (NDWI) extraídos de la imagen de fusión cruzada con una imagen de índice normalizado fue uno de los procesos de interés dentro de este proyecto, puesto que la realización de este paso permitió mejorar y aumentar la información sobre la vegetación y el agua respecto al área tratada, los resultados experimentales mostraron un desempeño

favorable en cuanto a reducción de errores de detección para áreas compiladas bajo diferentes tipos de suelo, especialmente en áreas cultivadas y bosques; convirtiéndose el método en una herramienta para monitoreo de los cambios en los humedales y proporcionar un soporte técnico efectivo para su conservación (Gao et al., 2018).

En el estudio titulado “A Hybrid of Optical Remote Sensing and Hydrological Modeling Improves Water Balance Estimation” realizado por Colin J. Gleason, Yoshihide Wada y Jida Wang para el año 2017. Aplica la combinación de estimaciones de descarga remota detectadas a través de la geometría hidráulica en muchas estaciones (siglas en inglés AMHG) y el modelo hidrológico PCR-GLOBWB para la estimación de descarga obtuvo resultados prometedores ante el hidrograma obtenido, corroborando una variación temporal del flujo de agua mensual para la cuenca estudiada, el Nilo; en lo referente al desarrollo del proyecto su contenido se enfocó en el monitoreo de los niveles de agua del cauce en relación a las características presentadas en la zona (Gleason et al., 2018); el método y programa de modelamiento usado en el proyecto permite su aplicabilidad a cualquier cuenca o cuerpo de agua, lo que resulta factible su consideración ante un análisis de las condiciones hidrológicas del área de estudio en el departamento de Córdoba y los niveles de agua presentados por la ciénaga de Ayapel para cada temporada estudiada. En lo expuesto en el artículo “Monitoring the hydrology of Canadian Prairie Wetlands to Detect the Effects of Climate Change and Land Use Changes” llevado a cabo en el 2001 por F. Malcolm Conly y Garth van der Kamp se expone la forma en como las condiciones meteorológicas y atmosféricas en relación a las actividades desarrolladas en el área influyen en los niveles de agua y la ecología de los humedales, además del amplio número de datos a escala regional complementados con mediciones intensivas a fin de obtener un análisis claro y preciso ante la temática abordada en el proyecto relacionado con la influencia del cambio climático sobre la ecología y el contenido de agua en los humedales (Conly & van der Kamp, 2001); en este contexto, el uso de datos para el complejo cenagoso de Ayapel en el departamento de Córdoba a escala regional en relación estadística con el clima del área de interés permite un análisis puntual sobre el espacio ocupado por la ciénaga a partir de registros meteorológicos llevados a cabo en el área para las fechas que pertenecen las imágenes de interés.

Para el estudio llevado a cabo por Xibao Xu, Bo Jiang, Yan Tan, Robert Costanza y Guishan yang, titulado “Lake-Wetland Ecosystem Services Modeling and Valuation: Progress, Gaps and Future Directions” se exponen las diversas necesidades de gestión confiables y el uso de métodos económicos que cuantifiquen las compensaciones a través de escalas espacio-temporales y que permitan la evaluación de los humedales alternativos. El desarrollo de este estudio llevado a cabo en china, expone puntos de interés en el análisis de comportamiento para nuestro humedal de estudio ante las comparaciones a realizar en sus diferentes épocas y temporalidades. Dado que la investigación llevada a cabo retrata el interés de las áreas de humedal en relación directa con los diversos servicios ecosistémicos que proporcionan, la aplicabilidad metódica y analítica establece una secuencia de fácil comprensión que permite obtener conclusiones veraces encaminadas a la toma de decisiones trascendentales y de interés biológico, ecológico y ambiental en beneficio del ecosistema de interés estudiado. Por otra parte, en el estudio realizado por Leydi Tatiana García Parra, titulado “Análisis Multitemporal del Humedal la Conejera Sector: Suba Compartir” establece una comparación entre las condiciones físicas del humedal la conejera para distintos periodos de tiempo, más específico, 3 épocas o años de análisis a partir de imágenes digitales proporcionadas por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), en donde se expone una correlación entre sociedad-humedal, relacionado al crecimiento en la infraestructura o desarrollo económico social, impulsado por el hombre y la pérdida de área de ocupación del humedal, es decir la reducción de su cauce (Parra, 2018).

El deterioro de los cuerpos de agua de interés ecosistémico y social en la actualidad se establece dentro de un ámbito de gran importancia, debido no solo a su factibilidad dentro del crecimiento económico de las sociedades, sino a los beneficios ambientales, ecológicos y biológicos en sus procesos. El interés actualmente por este tipo de sistemas radica en las diversas problemáticas que en los últimos años han tenido un auge evidente; como el cambio climático, sequías, inundaciones, altas temperaturas, entre otras. Un ejemplo sobre estos acontecimientos es el estudio llevado a cabo por Xia Jing, Yufang Huang, Guangyan Lou y Yiwei Bao titulado “Analysis of Wetland Dynamic Change and Ecological Health in Wuliangsuhai Based on Multi-Temporal Remote Sensing Image”,

en el cual se analizaron los factores impulsores del cambio en la estructura del humedal Wuliangsuhai, permitiéndose observar ciertas variaciones relacionadas con el estado del mismo para los años analizados. No obstante, los resultados obtenidos proporcionaron una base científica para el manejo del humedal Wuliangsuhai y tienen un valor de referencia importante para el monitoreo de la estructura y el estado de salud del humedal a través de datos de teledetección (Jing et al., 2018); el manejo del humedal Wuliangsuhai basado en los datos obtenidos a partir de la investigación realizada por el grupo comprende uno de los objetivos el cual se planea alcanzar a lo largo del desarrollo de este proyecto, teniendo en cuenta literatura relacionada a lo largo del documento, dentro de la cual se encuentra “Dynamics of shallow lake cover types in relation to Paraná River Flood Pulses: Assessment With Multitemporal Landsat Data” en donde se plantea un análisis de los patrones espaciales y temporales en las coberturas vegetales de los humedales encontrados en la llanura del bajo Paraná, se establecieron índices de diferencia normalizada con el fin de establecer posibles pulsos de inundación, este proceso cuya aplicabilidad es altamente factible para el humedal de la ciénaga de Ayapel, dada la posibilidad de identificación pequeños cuerpos de agua fragmentados en tiempos de bajo nivel de agua para la ciénaga, diferencia apreciable para los productos de trabajo pertenecientes a los periodos secos de los años trabajados.

En base a lo anteriormente expuesto la identificación de canales que surten al cuerpo de agua y el análisis al comportamiento de la ciénaga en los diferentes periodos tratados, permitirá establecer los cambios y alteraciones que puedan estar o no relacionados con las temporadas de estudio analizadas, como seca y lluviosa. Sin embargo, la identificación de posibles alteraciones que pueden representar el grado de deterioro del humedal, permitirá el establecimiento de estrategias que mitiguen dichas fallas en el uso o aprovechamiento del recurso por parte de las comunidades aledañas localizadas en la zona.

3.3. Diseño metodológico

En la figura 1 se presenta un esquema general del desarrollo metodológico de la presente investigación.

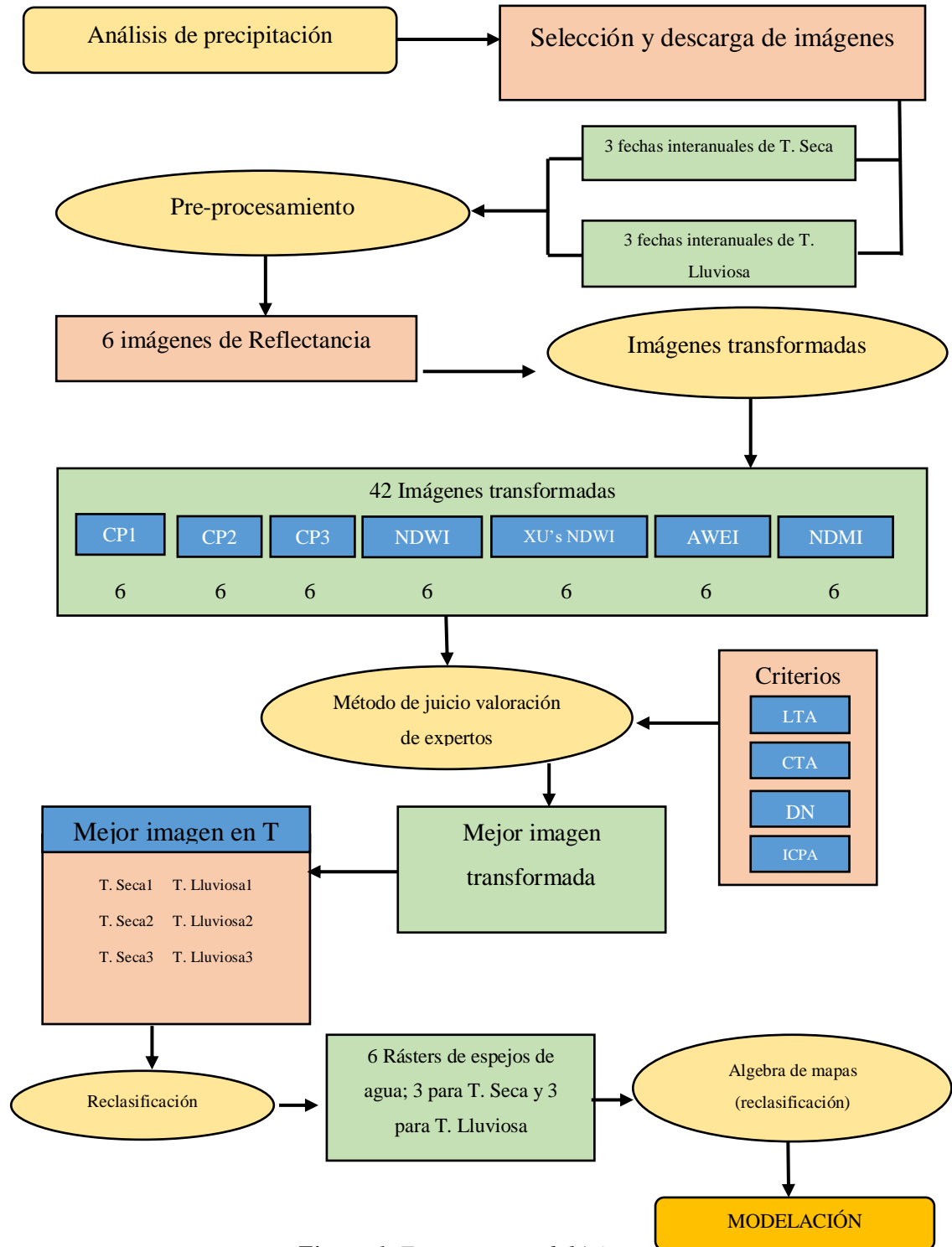


Figura 1. Esquema metodológico.

3.3.1. Revisión de información secundaria

En el proceso de síntesis de información se revisaron estudios llevados a cabo en la ciénaga relacionados con posibles problemáticas, con el comportamiento de la hidrología e informes de manejo de los procesos de gestión de esta área de interés ecológico. Estos estudios fueron utilizados para soportar los resultados de la presente investigación.

3.3.2. Selección de imágenes

Para la selección de las imágenes, se consideraron dos características principales: 1) la temporalidad climática de la zona, época seca y lluviosa respectivamente; y 2) las imágenes seleccionadas deberán tener el menor número de nubes posibles con el fin de apreciar el límite tierra-agua.

3.3.2.1. Análisis de datos de precipitación

Se consideraron series de datos pluviométricos de la zona, para un periodo de 33 años, provenientes de estaciones hidrometereológicas seleccionadas (tabla 1) estratégicamente entorno al ecosistema cenagosos de Ayapel. Se establecieron 7 estaciones para desarrollo de análisis pluviométrico. (Ver ilustración 2)

Código	Tipo	Nombre	Cuenca	Municipio	Latitud	Longitud	Elevación (m.s.n.m)
25020480	PG	Los Pajaros	Ciénaga de Ayapel	Ayapel	820 N	7452 W	25
25021470	PM	Torno El HDA	San Jorge	San Marcos	834 N	7505 W	60
25025150	CO	Ayapel	Ciénaga de Ayapel	Ayapel	817 N	7509 W	22
25021010	PM	Buenavista	QDA. Cantarana	Buenavista	813 N	7528 W	110
25020700	PM	La Apartada	San Jorge	La Apartada	802 N	7520 W	50
25020780	PM	Cecilia	Ciénaga de Ayapel	Ayapel	827 N	7502 W	20
25020740	PM	Eureka HDA	Ciénaga La Cruz	San Marcos	834 N	7505 W	20

Tabla 1. Estaciones Hidrometereológicas seleccionadas para tratamiento de información pluviométrica; **Fuente:** Elaboración Propia.

Los registros pluviométricos para las 7 estaciones se totalizaron anualmente; con el fin de establecer similitudes en el comportamiento del régimen de lluvias, como un referente de la entrada de agua al complejo para el proceso de selección de imágenes.

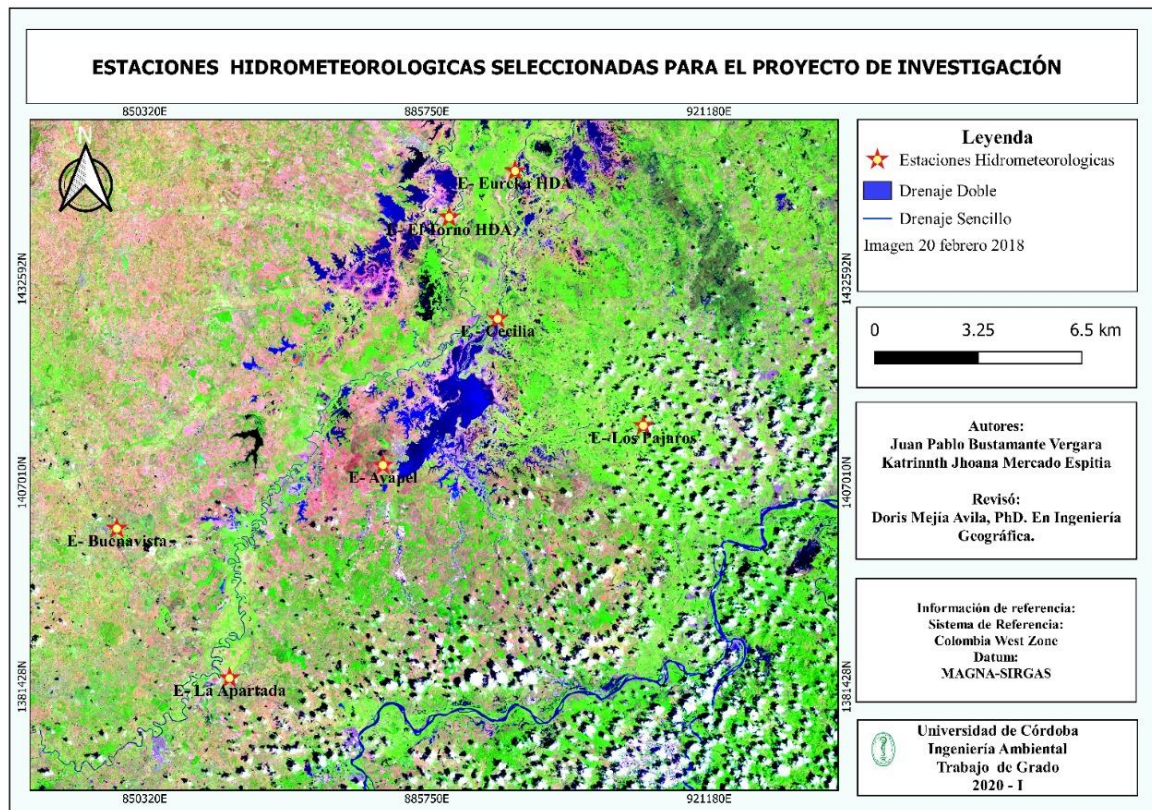


Ilustración 2. Mapa de la ubicación geográfica de las estaciones hidrometeorológicas seleccionadas; **Fuente:** Elaboración Propia

Los datos de precipitación suministrados por el instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, IDEAM (IDEAM, 2019); para el periodo de análisis pertenecientes a la zona de interés fueron sometidos a un proceso de ajuste mediante el método de interpolación entre estaciones, basado en el uso de valores de precipitación existentes. Se estimaron los datos de lluvia faltantes como el promedio de la precipitación ocurrida en tres estaciones adyacentes bajo la misma influencia topoclimática para la obtención de resultados satisfactorios (Antelo & Long, 2014).

Ecuación del método de interpolación con otras estaciones:

$$D_j = \frac{a_j + b_j + c_j}{3}$$

Donde:

D_j : Precipitación estimada para el día j

a_j, b_j, c_j : Precipitación registrada en las estaciones de referencia el día j

3.3.2.2. Selección y descarga de imágenes

De acuerdo al análisis climático se seleccionaron 6 imágenes; 3 imágenes comparables para cada temporada, teniendo en cuenta que el total de precipitación para la fecha de toma de imágenes fuese similar para las tres imágenes de verano, repitiendo este criterio para la selección de las tres imágenes de temporada lluviosa. Las imágenes fueron descargadas de la base de datos del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS, 2014).

3.3.2.3. Generación de radiancia y reflectancia.

Las imágenes establecidas para desarrollo del estudio, se calibraron mediante la manipulación de los valores de los píxeles en cada una de las bandas que la componen, conversión a TOA (Spectral Reflectance). Sin embargo, previamente se debe calcular la radiancia con el fin de eliminar el fenómeno de reflectividad en la superficie; este cálculo, se realiza por medio de ecuaciones citadas en la literatura científica abordada (Muñoz et al., 2010).

Ecuación para el cálculo de la Radiancia espectral TOA en sensores TM y ETM+:

$$L_{\lambda} = \left(\frac{L_{máx\lambda} - L_{Mín\lambda}}{Q_{calMáx} - Q_{calMín}} \right) (Q_{cal} - Q_{calMín}) + L_{Mín\lambda}$$

Donde:

L_{λ} : El valor del píxel como Radiancia

Q_{cal} : Número digital

$L_{Mín\lambda}$: Radiancia espectral se escala a QCALMIN

$L_{Máx\lambda}$: Radiancia espectral se escala a QCALMAX

$Q_{calMáx}$: Valor máximo de píxel calibrado cuantizado.

$Q_{calMín}$: Valor mínimo de píxel calibrado cuantizado

Las imágenes trabajadas en este pre-proceso pertenecen a los sensores TM, ETM y OLI-TIRS. Para las imágenes de este tipo de sensor, la calibración radiométrica implica volver a escalar los números digitales sin procesar (Q) transmitidos desde el satélite a los números digitales calibrados (Q cal), que tienen la misma escala radiométrica para todas las escenas procesadas en el terreno en un período específico. Durante la calibración radiométrica, los valores de píxel (Q) de los datos de la imagen sin procesar, se convierten en unidades de radiación espectral absoluta utilizando cálculos de coma flotante de 64 bits (Chander et al., 2009). Por el contrario, las imágenes pertenecientes al sensor OLI -TIRS en el proceso de conversión de los datos originales a reflectancia espectral TOA, se hicieron por medio del uso de los factores rescalados que se obtienen desde los metadatos mediante su debida ecuación (CONAE, 2016). En la figura 2 se sintetiza la estructura del proceso de cálculo para la radiancia.

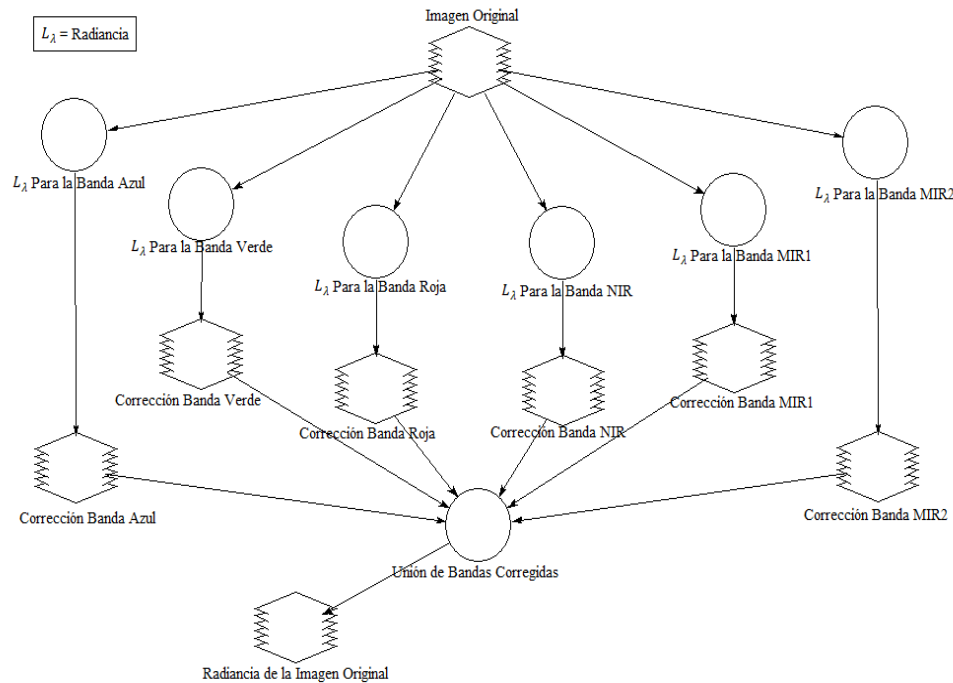


Figura2. Estructura para el cálculo de la radiancia en imágenes TM y ETM.;

Fuente: Elaboración propia.

Los valores medidos por los sensores captan la radiancia, la cual corresponde a la energía enviada en una dirección dada hacia el sensor, sin embargo, el cálculo de la reflectancia

es primordial dada la relación entre la energía reflejada contra la potencia total de energía medida por el sensor.

El cálculo de la reflectancia (TOA) puede lograr una reducción en la variabilidad de escena a escena, al convertir la radiación espectral en el sensor en reflectancia (TOA) exoatmosférica, también conocida como albedo planetario en banda. Al comparar imágenes de diferentes sensores, existen ciertas ventajas en el uso de la reflectancia (TOA) en lugar de la radiación espectral en el sensor. El cálculo de esta variable elimina el efecto coseno de diferentes ángulos del cenit solar debido a la diferencia de tiempo entre las adquisiciones de los productos; compensando los diferentes valores de la irradiancia solar exoatmosférica que surge de las diferencias de las bandas espectrales de cada imagen. Además, corrige la variación en la distancia Tierra-Sol entre diferentes fechas de adquisición de los datos. Estas variaciones son significativas geográfica y temporalmente en el desarrollo de proyectos a partir de imágenes satelitales multitemporales (Chander et al., 2009).

Ecuación para el cálculo de la reflectancia espectral TOA en sensores TM y ETM+:

$$p_{\lambda} = \frac{\pi \cdot l_{\lambda} \cdot d^2}{ESUN_{\lambda} \cdot \cos \theta_s}$$

Donde:

P_{λ} = Reflectancia TOA planetaria (Sin unidades)

L_{λ} = La Radiancia espectral

d = la distancia tierra-sol en unidades astronómicas

$ESUN_{\lambda}$ = Irradiaciones exoatmosféricas solares

θ_s = Angulo cenital solar.

En la corrección de las imágenes provenientes de sensor OLI-TIRS, los datos pueden ser convertidos a valores de reflectancia (TOA) en el techo de la atmósfera, a partir de coeficientes de reflectancia rescalados, encontrados en los archivos de los metadatos MTL de las imágenes originales, no corregidas. El proceso de corrección de los ND a los valores de reflectancia captados por el sensor OLI se emplea mediante el uso ecuaciones que divergen de acuerdo al tipo de sensor que realiza la captura de la imagen seleccionada.

Ecuación para el cálculo de la reflectancia espectral TOA en sensor OLI-TIRS:

$$P_{\lambda} = \frac{(M_p \cdot Q_{cal} + A_p)}{\sin(\theta_{SE})}$$

Donde:

P_{λ} = Reflectancia TOA planetaria.

M_p = Factor multiplicativo específico de la banda de los metadatos.

Q_{CAL} = Valores de pixel de producto estándar cuantizados y calibrados (DN).

A_p = factor de rescalado aditivo específico de la banda de los metadatos.

θ_{SE} = Ángulo de elevación del sol local

El proceso de reajuste realizado por medio del programa ERDAS IMAGINE fue el mismo para las imágenes de trabajo previamente seleccionadas. Este proceso fue llevado a cabo por medio de la herramienta Model Maker, donde a partir de un modelo base en el cual se adiciona la imagen compilada original; se desglosa banda por banda implementando operaciones matemáticas e incluso aplicando ecuaciones como las citadas anteriormente, con el objetivo de llevar a cabo el reajuste para cada imagen en su época, y finalmente obtener una nueva imagen compilada con valores corregidos. En la figura 3 se sintetiza la estructura del proceso de cálculo de la reflectancia.

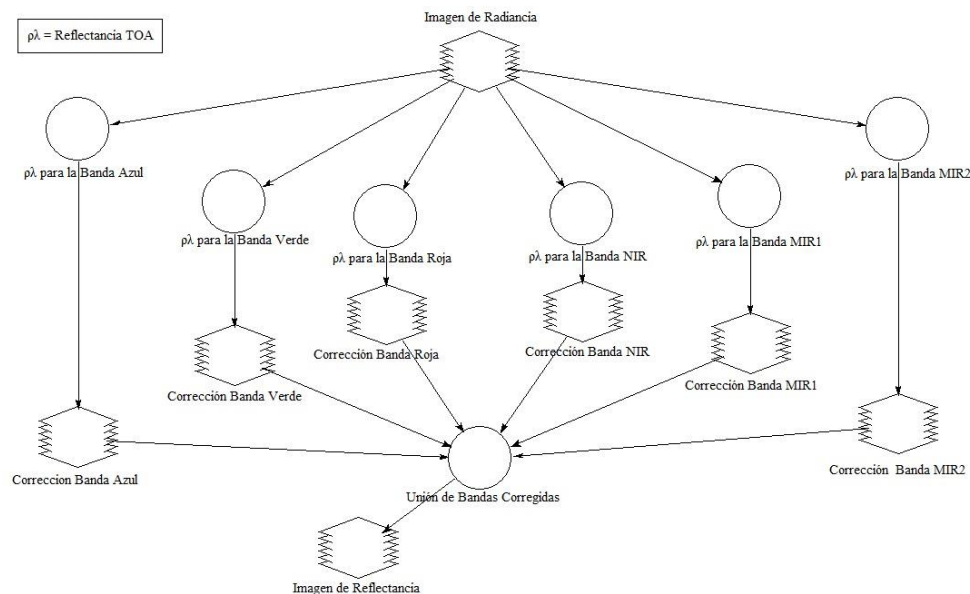


Figura 3. Estructura para el cálculo de la reflectancia en imágenes TM, ETM y OLI TIRS.; **Fuente:**

Elaboración propia

3.3.3. Generación y selección de imágenes transformadas

Con el objetivo de encontrar la mejor imagen o imágenes que permitieran la delimitación de los cuerpos de agua de la ciénaga; cada una de las imágenes de reflectancia fue transformada en 7 nuevas imágenes, obteniendo un total 42 imágenes comparativas. Las siete imágenes transformadas corresponden a las 3 primeras componentes principales de las imágenes y a 4 índices de agua: el índice de diferencia normalizado de agua (NDWI), el índice de diferencia normalizado de agua modificado de Xu's (NDWI Xu's), el índice de extracción de agua automatizada (AWEI) y el índice de diferencia de humedad normalizado (NDMI). En la tabla 2 se listan los índices de agua utilizados con sus respectivas ecuaciones.

Índice	Ecuación	Fuente
Índice de agua normalizado (NDWI)	$\frac{Green - NIR}{Green + NIR}$	McFeeters, 1996
Índice de agua normalizado de Xu's (NDWI Xu's)	$\frac{Green - MIR}{Green + MIR}$	Li et al, 2013; Xu, 2006
Índice de Extracción de Agua Automatizada (AWEI)	$4 * (Green - MIR) - [(0,25 * NIR) + (2,75 * SWIR)]$	Feyisa et al. 2014
Índice de Diferencia de Humedad Normalizado (NDMI)	$\frac{NIR - MIR}{NIR + MIR}$	Wilson and Sader, 2012

Tabla2. Índices de agua utilizados; **Fuente:** Elaboración Propia

Para el proceso de transformación de las imágenes se utilizó la herramienta Model Maker del software ERDAS IMAGINE.

En el proceso de selección de la imagen transformada que mejor representara el límite del espejo de agua, se utilizó el método de validación por juicio de expertos (Steenbergen & Marks 2007). Tres expertos (los investigadores del proyecto) calificaron cada una de las 42 imágenes de acuerdo a la facilidad de discriminación de 4 criterios: límite tierra-agua (LTA), contraste tierra-agua (CTA), diferenciación de nubes de otras cubiertas (DN) e identificación de cuerpos pequeños de agua (ICPA). Los criterios fueron ponderados de

acuerdo a los periodos estacionales (Tabla 3). Y finalmente totalizados para cada tipo de imagen transformada, seleccionando la que mayor puntaje tuvo.

Criterios	Acrónimo	Ponderación	Ponderación
		Temporada Seca	Temporada Lluviosa
Límite Tierra – Agua	LTA	0,3	0,15
Contraste Tierra – Agua	CTA	0,2	0,25
Diferenciación de nubes	DN	0,1	0,3
Identificación de cuerpos de agua pequeños	ICP	0,4	0,3
Rangos de calificación		1(Deficiente), 3(Aceptable); 5(Bueno)	

Tabla 3. Criterios y ponderaciones del proceso de selección de índice de trabajo; **Fuente:** Elaboración Propia.

3.3.4. Obtención de cuerpos de agua en formato ráster para temporadas interanuales e interestacionales.

Una vez seleccionada la imagen transformada que mejor permite diferenciar los espejos de agua, a partir de las imágenes interanuales e interestacionales transformadas, por medio del método de muestreo de clasificación supervisada se determinaron los rangos de reflectancia de los cuerpos de agua para cada imagen.

Se reclasificaron 6 imágenes transformadas, a partir de los rangos de reflectancia de los cuerpos de agua para cada imagen. Para la reclasificación se utilizó el software QGIS utilizando valores de 1 para espejos de agua y 100 para el resto de cubierta.

Valor Reclasificado	Atributo
1	Agua
100	Vegetación (Herbácea), Cultivo, Nubes, Suelo Desnudo, Área Urbana.

Tabla 4. Valores establecidos para el proceso de reclasificación del rásters; **Fuente:** Elaboración Propia.

3.3.5. Modelación espacio temporal.

La modelación espacio temporal del complejo de humedales buscó establecer cambios asociados a: a) la capacidad de recepción de aguas permanentes, b) la fragmentación del

complejo y c) la capacidad de amortiguación de inundaciones o capacidad máxima de recepción de aguas. La figura 4 ilustra los procesos a desarrollar para la modelación de la dinámica espacio temporal del complejo cenagoso de Ayapel en los 33 años de análisis.

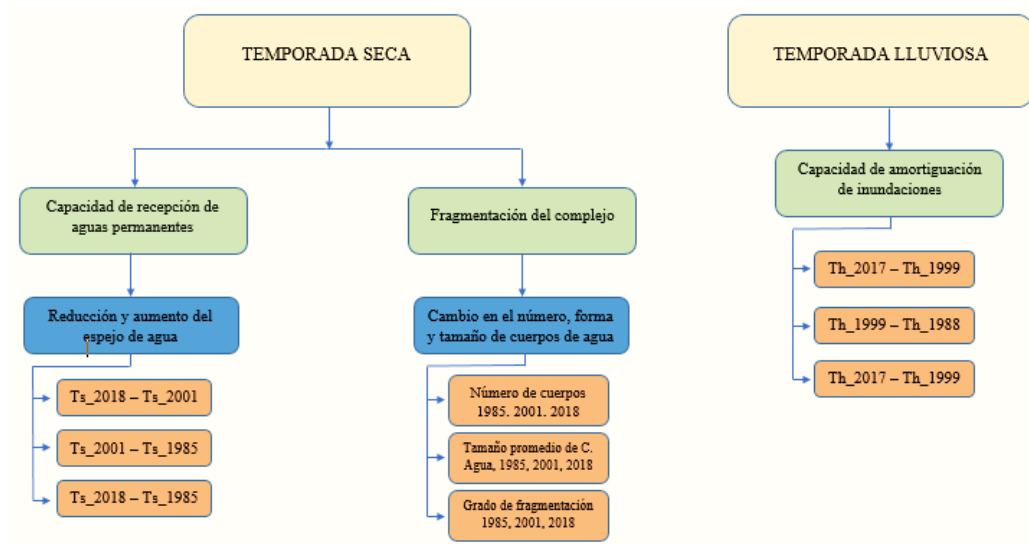


Figura 4. Proceso de modelación de la dinámica espacio temporal del complejo cenagoso de Ayapel;

Fuente: Elaboración Propia.

Para la capacidad de recepción de aguas permanentes, a través de procesos de álgebra de mapas se compararon las imágenes de temporada seca para los periodos interanuales (figura 4). Se aplicó un filtro de 4 píxeles (0.360 ha) para determinar los cuerpos de agua más pequeños; y finalmente se vectorizó cada ráster.

Para analizar la fragmentación del complejo se utilizaron 3 métricas de fragmentación: números de cuerpos de agua (#CA), tamaño promedio de los cuerpos de agua (TPCA) y grado de fragmentación (GF= área de cuerpos de agua/área total). Los cálculos se realizaron en formatos vectoriales y se descartó la temporada de 1985, dado que la imagen presentaba en el sector occidental algunas nubes que ocultaban algunos cuerpos de agua pequeños.

Para analizar la capacidad de amortiguación de inundaciones a través del álgebra de mapas se compararon las imágenes de temporada húmeda para los periodos interanuales (Figura 4).

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

4.1. Productos Seleccionados

Se seleccionaron 6 imágenes: 3 para cada temporada climática de tres periodos interanuales. En la tabla 5, se listan las imágenes descargadas.

TEMPORADA	FECHA	SENSOR	PATH	ROW
Seca	24 – Enero – 1985	Landsat 5 TM	009	054
Seca	5 – Febrero – 2001	Landsat 5 TM	009	054
Seca	20 – Febrero – 2018	Landsat 8 Oli Tirs	9	54
Lluviosa	23 – Octubre – 1988	Landsat 5 TM	009	054
Lluviosa	23 – Mayo – 1999	Landsat 5 TM	009	054
Lluviosa	31 – Octubre – 2017	Landsat 8 Oli Tirs	9	54

Tabla 5. Imágenes seleccionadas; **Fuente:** Elaboración propia

La selección de imágenes estuvo orientada por un análisis pluviométrico de 33 años. En las gráficas 1 y 2 se presentan para el año de selección de cada imagen, los pluviogramas con valores totales de precipitación media mensual de las 7 estaciones que se encuentran en el área de captación del complejo cenagoso.

El cuadro rojo indica el mes de obtención de las imágenes para temporada seca en diferentes años (Grafica 1). Se puede evidenciar que para 2018 (año de selección de una de las imágenes) la precipitación tuvo valores más altos, sin embargo, fue necesario trabajar con esta, dado que no se encontró para la misma temporada una imagen adecuada en años recientes.

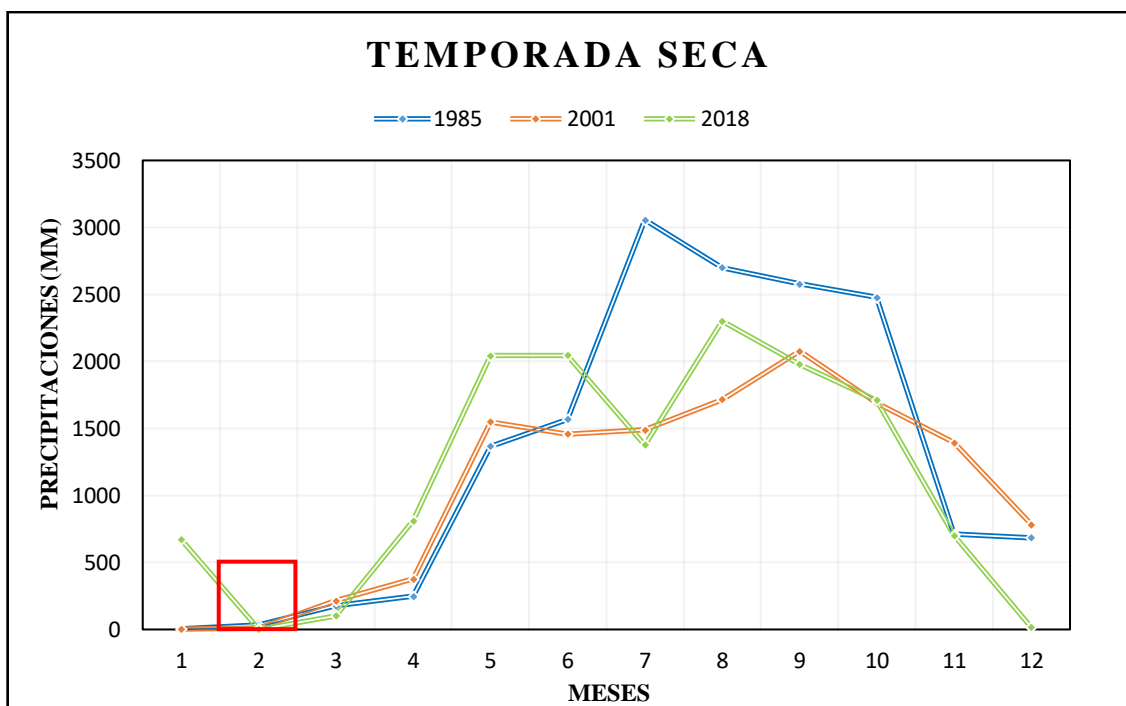


Grafico 1. Pluviogramas para los años de selección de imágenes de temporada seca;

Fuente: Elaboración Propia.

En temporada lluviosa, fue posible seleccionar tres imágenes de fechas que coincidieran con valores cercanos de precipitación (grafico 2). En la tabla 6 se presentan los valores totales mensuales de precipitación para los meses de selección de las imágenes.

TEMPOTRADA	IMAGEN	TOTAL PRECIPITACIÓN (mm)
Seca	24 enero 1985	18,553
	5 febrero 2001	3,931
	20 febrero 2018	223,867
Lluviosa	23 octubre 1988	1821,132222
	23 mayo 1999	1436,447
	31 octubre 2017	1826,130

Tabla 6. Precipitaciones totales mensuales, imágenes seleccionadas;

Fuente: Elaboración Propia

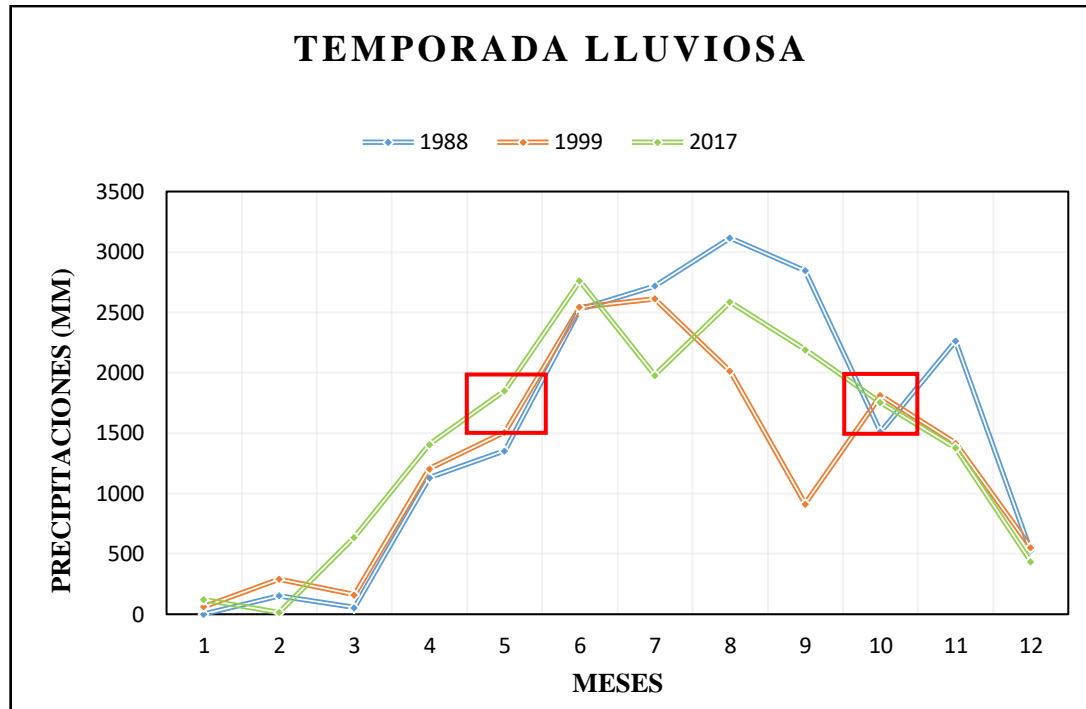


Grafico 2. Pluviogramas para los años de selección de imágenes de temporada lluviosa;

Fuente: Elaboración Propia.

4.2. Obtención y selección de imágenes transformadas

En la ilustración 3 se presentan las 7 Imágenes transformadas para la escena del 13 de octubre de 1988: el índice de diferencia normalizado de agua (NDWI), índice de diferencia normalizado de agua modificado de Xu's (NDWI Xu's), el índice de extracción de agua automatizada (AWEI), el índice de diferencia de humedad normalizado (NDMI) y las 3 componentes principales de las imágenes; para las 5 escenas restantes se obtuvieron los juegos de las 7 imágenes transformadas, para un total de 42 imágenes.

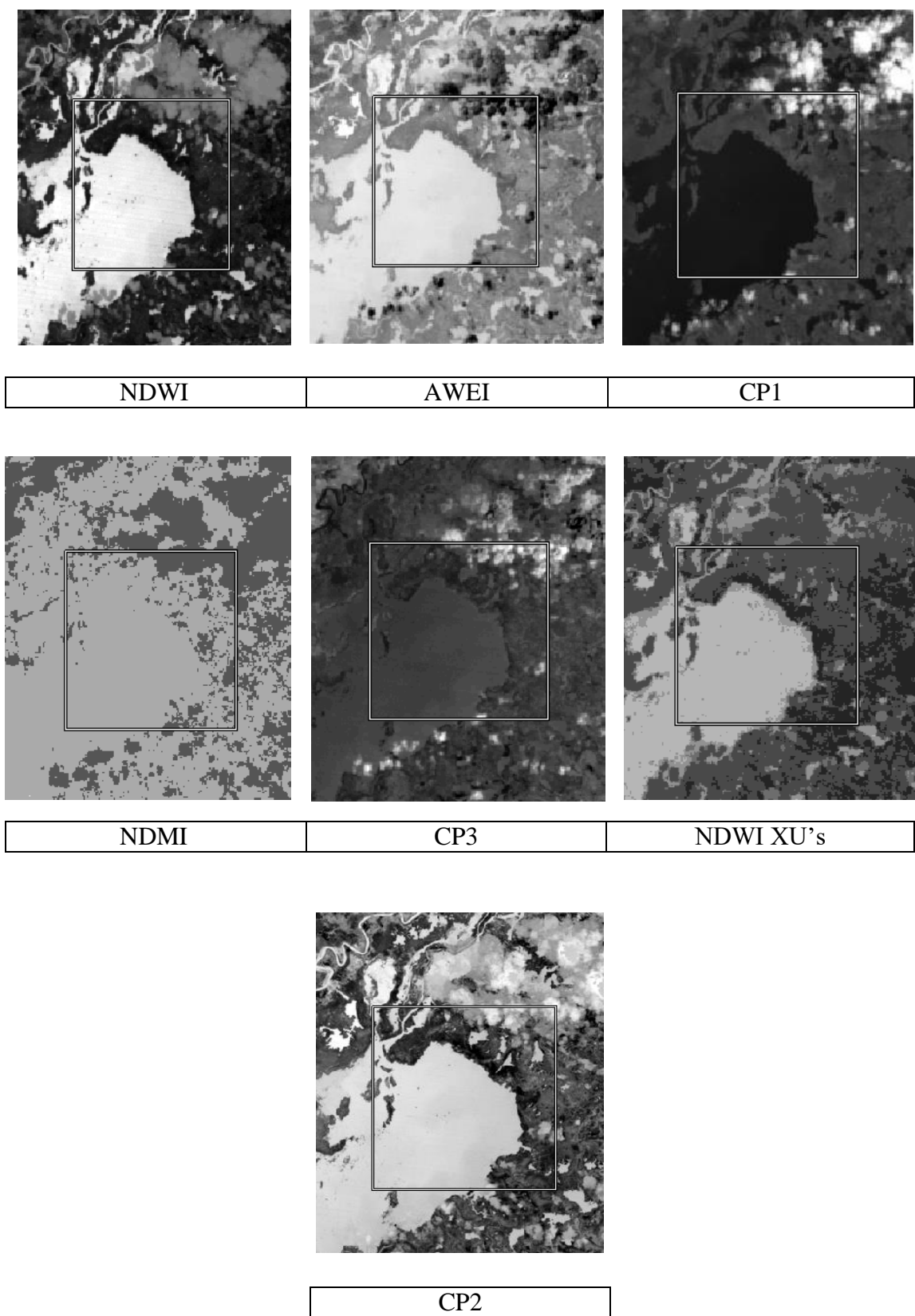


Ilustración 3. Representación de índices y componentes para la Imagen 23 de octubre de 1988

4.2.1. Imagen transformada seleccionada.

En la tabla 7 se totalizan las evaluaciones por juicio de los expertos para cada una de las imágenes transformadas, donde cada fila corresponde a la sumatoria de los 4 criterios: límite tierra – agua, contraste tierra – agua, diferenciación de nubes con la cubierta agua e identificación de cuerpos pequeños de agua.

A partir de la valoración del método, se seleccionó el índice de agua de diferencia normalizada – NDWI. El cual obtuvo la mayor valoración por parte de los expertos (67.1), producto de la sumatoria de los totales obtenidos por cada temporada.

TEMPORADA SECA								
IMAGEN	EXPERTO	AWEI	NDMI	NDWI	NDWI-XUS	CP1	CP2	CP3
24 enero 1985	Exp. 1	4	1,6	3,4	4,8	4	2	3,8
	Exp. 2	4	2	2	3	4	2	4,6
	Exp. 3	4,2	1	2	2,2	3	1	4,2
5 febrero 2001	Exp. 1	4,8	2	4	3,2	4,1	4,6	3,8
	Exp. 2	3,8	2	4	4	3,4	3	4,6
	Exp. 3	3,6	1,6	3,8	3,4	3,8	2,6	2
20 febrero 2018	Exp. 1	3,8	3,8	3,6	5	1,6	4	1
	Exp. 2	4	4,6	4,8	4,8	2,5	4,6	1
	Exp. 3	2,6	2,6	2,8	4,6	2,6	4,2	1
Total Temporada		34,8	21,2	30,4	35	29	28	26

TEMPORADA LLUVIOSA								
IMAGEN	EXPERTO	AWEI	NDMI	NDWI	NDWI-XUS	CP1	CP2	CP3
23 octubre 1988	Exp. 1	3	1	5	3	3,3	2,7	1
	Exp. 2	3,8	1	5	1,8	5	3,3	1
	Exp. 3	1,3	1	2,7	1,3	3,3	1,3	1,6
23 mayo 1999	Exp. 1	2,9	2,7	3,8	4,2	3,8	1,8	2,7
	Exp. 2	3,2	1,8	5	3,8	3,8	3,2	1,6
	Exp. 3	2,1	1	2,4	2,1	3,3	1,9	1,6
31 octubre 2017	Exp. 1	1	1,5	5	3,8	1,3	3,8	1
	Exp. 2	2,4	1,3	4,4	3,9	2,1	3,2	3
	Exp. 3	1	1,9	4,4	4,2	2,4	3,2	2,7
Total Temporada		20,7	13,2	37,7	28,1	28,3	24,4	16,2
TOTAL		55,5	34,4	68,1	63,1	57,3	52,4	42,2

Tabla 7. Resultados del método de juicio de expertos; **Fuente:** Elaboración propia.

En las ilustraciones de la 4 a 8 se compara el índice NDWI con las demás imágenes transformadas, a partir de los criterios propuestos para la evaluación.

En la ilustración 4 se observa como el límite tierra-agua está más nítidamente diferenciado en el NDWI, en el cual prácticamente se visualiza la línea que los diferencia, mientras que en los CP la falta de contraste no permite una clara diferenciación entre lo correspondiente a agua y suelo. Por otra parte, en AWEI y NDWI Xu’s se presentan una leve definición que no es tan marcada para establecer una diferencia; en cuanto al NDMI los resultados fueron completamente desfavorables en la definición del límite.

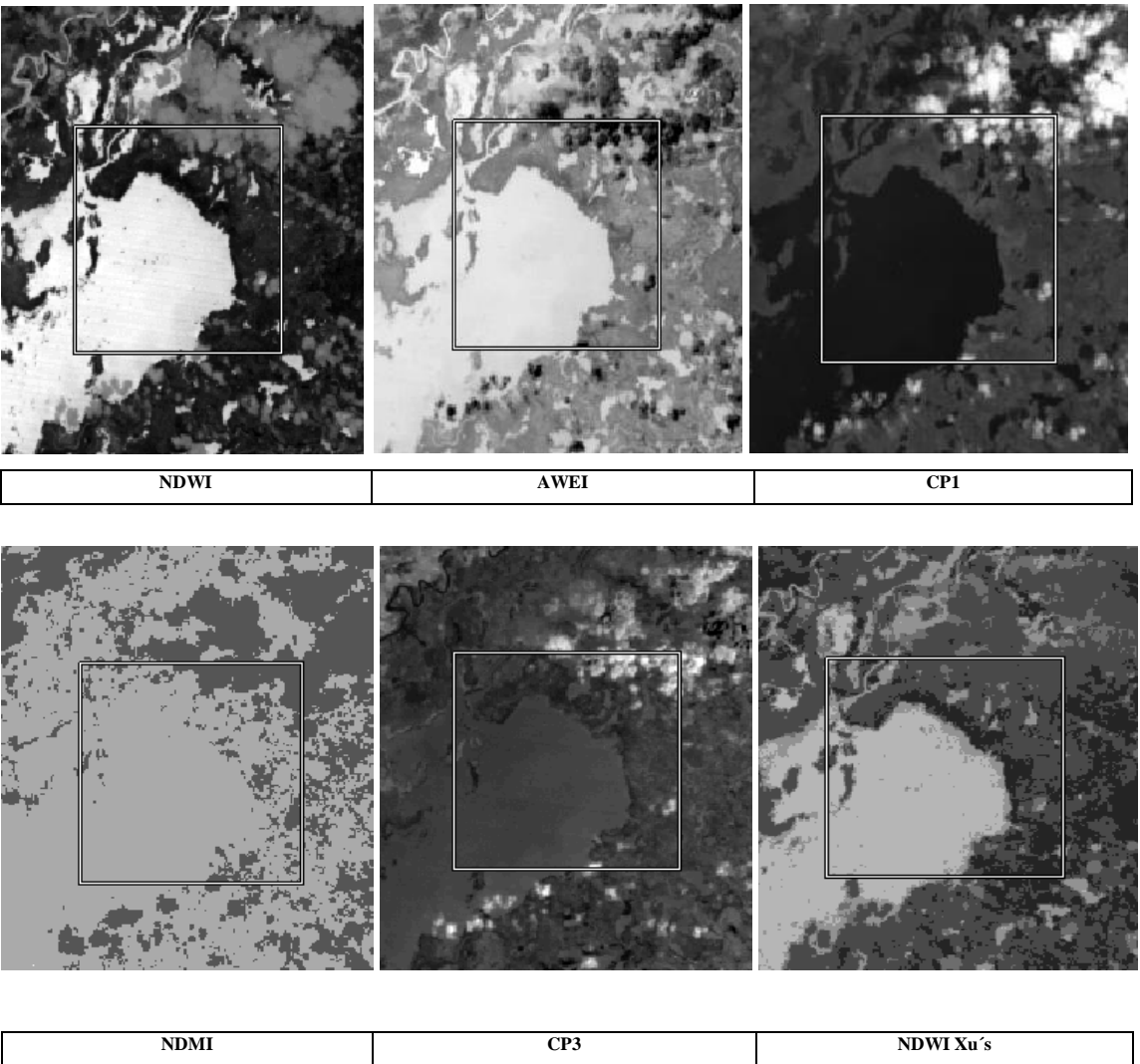


Ilustración 4. Límite tierra- agua imagen, 23 octubre 1988. Selección de Imagen.

El criterio de contraste entre el agua y tierra mostró mejores diferencias de intensidad en la iluminación de la gama de blancos y negros para el NDWI, resaltando mejor los cuerpos de agua. Mientras que para NDWI, Xu's y el CP3 se realzan tonalidades similares, el contraste es aceptable, pero no resalta el agua sobre los demás atributos, en comparación al seleccionado. Por otra parte, el NDMI, CP2 y el AWEI, muestran un contraste deficiente entre el agua con los demás atributos que conforman la imagen. En la ilustración 5 se aprecian las diferencias en el contraste para las imágenes transformadas.

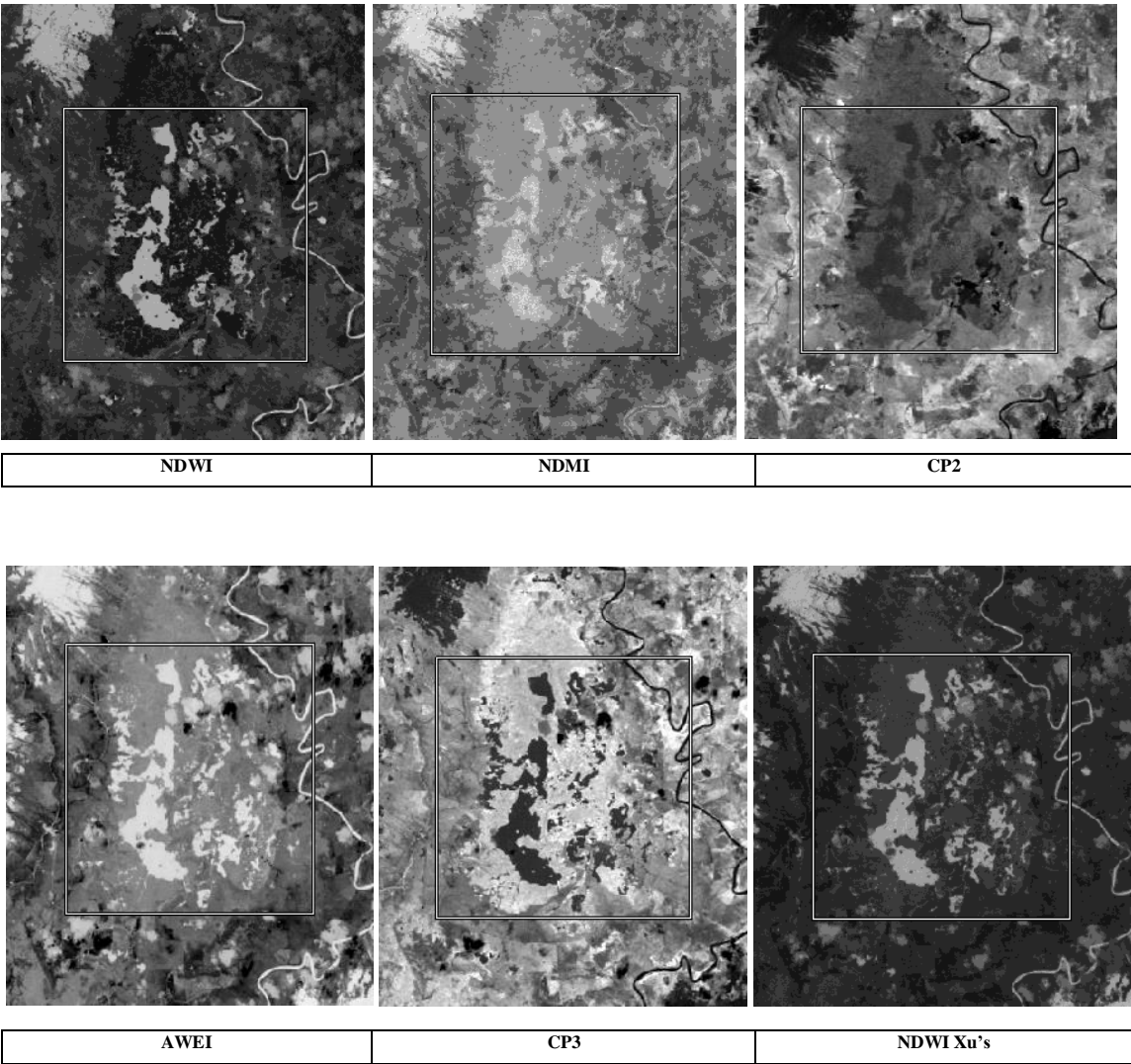


Ilustración 5. Contraste tierra- agua imagen, 5 febrero 2001. Selección de Imagen.

Para el criterio de diferenciación de las nubes, el índice NDWI fue el que mejores resultados mostro en la definición de nubes y agua. Aunque, para los CP1 y CP3 la definición de nubes es buena, no se enmarca una clara diferencia con el cuerpo de agua, ya que la sombra como parte de la nube presentaba textura similar en cuanto a coloración con el agua, dificultando apreciar los cuerpos de agua presentes en sus cercanias. A continuación en la ilustración 6 se observan sectores de evaluación para el criterio de dierenciación de nubes con la cubierta agua.

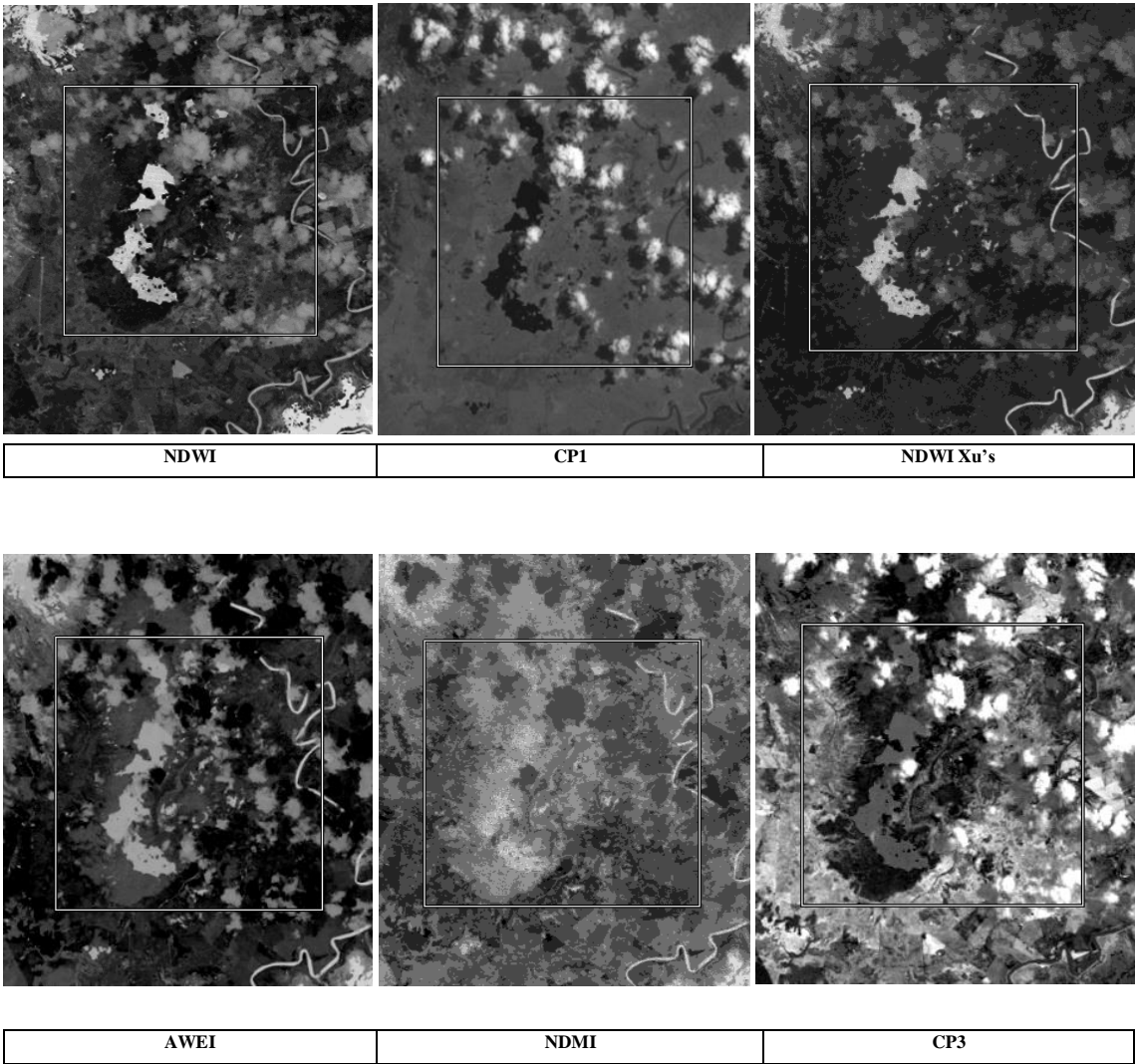


Ilustración 6. Diferenciación de Nubes, 23 mayo 1999. Selección de Imagen.

En la ilustración 7 se aprecian las zonas de evaluación del criterio de identificación de cuerpos pequeños, en donde el NDWI fue que el mejor delimito los cuerpos de menor tamaño; en comparación a el NDMI, NDWI Xu's y CP2, los cuales arrojaron los resultados más desfavorables en la delimitación y diferenciación de cuerpos pequeños. Por otra parte, AWEI y CP3 permiten diferenciar un poco mejor los cuerpos de agua, sin embargo, la delimitación de los cuerpos no se enmarca de forma clara

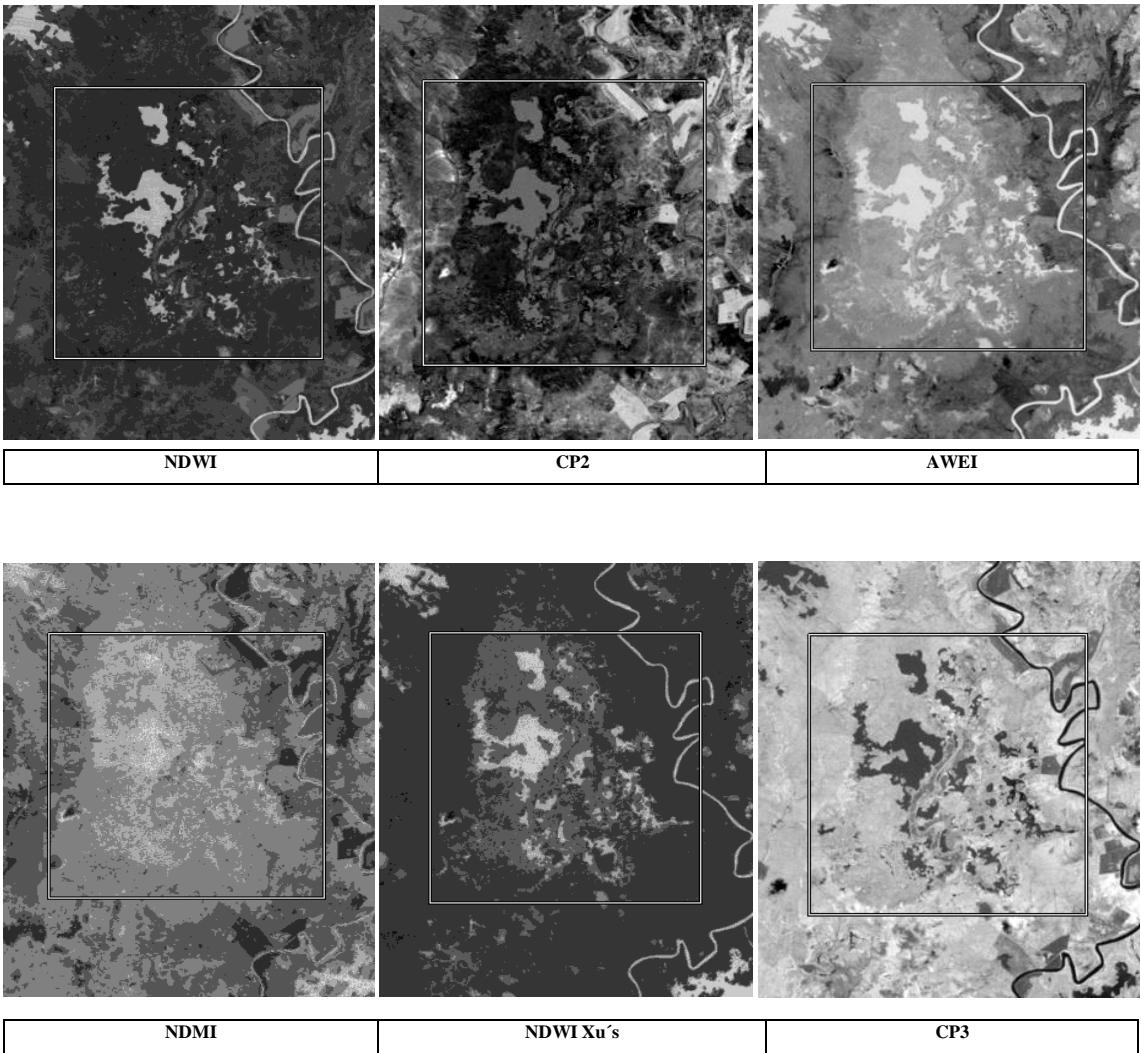


Ilustración 7. Identificación de cuerpos Pequeños de agua, 24 enero 1985. Selección de Imagen.

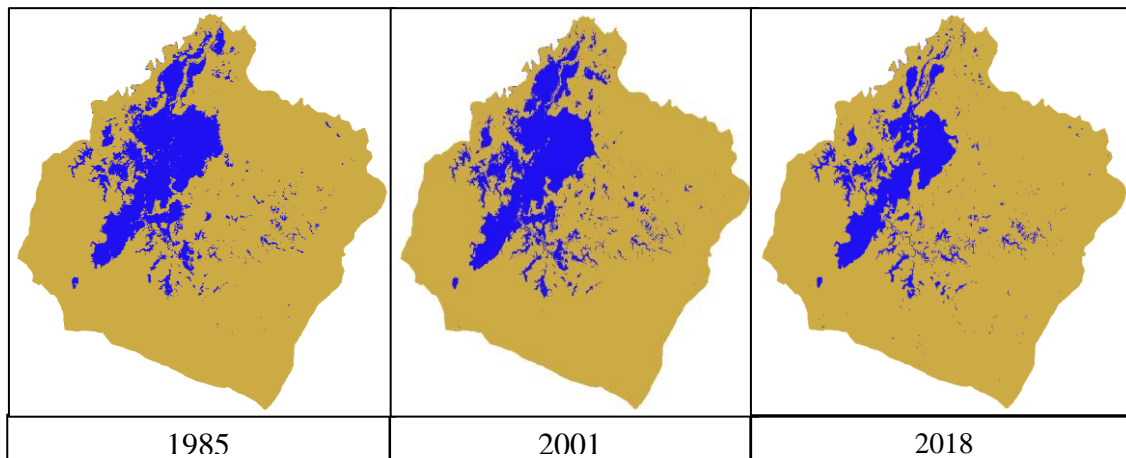
4.3. Delimitación del cuerpo de agua

En la tabla 8, se registran los rangos de niveles digitales correspondientes a la cubierta de los espejos de agua del complejo cenagoso de Ayapel en las imágenes del índice NDWI, para las diferentes temporadas estacionales e interanuales.

RANGO DE PÍXELES		
IMAGEN NDWI	TEMPORADA SECA	
	Limite Inferior (ND)	Limite Superior (ND)
24 de enero de 1985	156	159
5 de febrero de 2001	140	144
20 de febrero de 2018	27450	48196
IMAGEN NDWI	TEMPORADA LLUVIOSA	
	Limite Inferior (ND)	Limite Superior (ND)
23 de octubre de 1988	160	175
23 de mayo de 1999	224	233
31 de octubre de 2017	31182	51059

Tabla 8. Rango de píxeles para las cubiertas de agua; **Fuente:** Elaboración Propia.

A partir de los valores de pixel agrupados se obtuvieron rásters de los cuerpos de agua reclasificados para cada una de las imágenes. En las siguientes ilustraciones se pueden observar los resultados obtenidos del proceso de reclasificación.



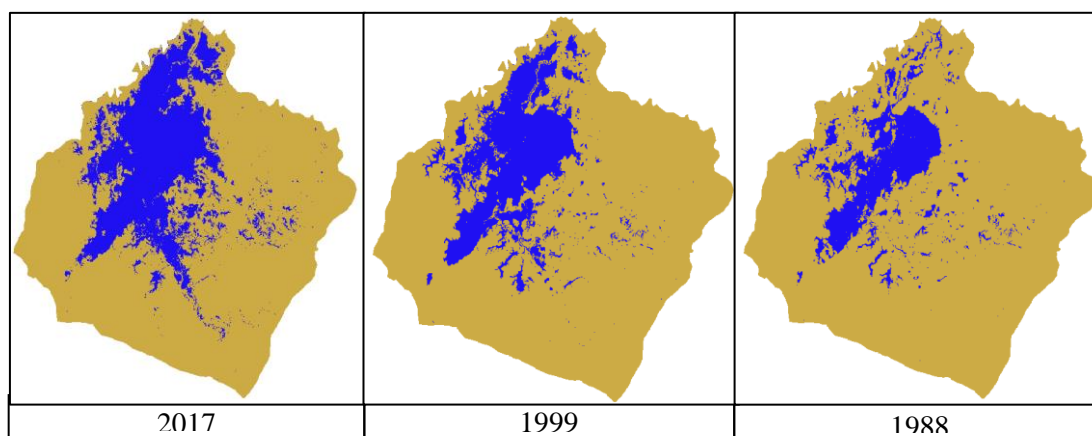


Ilustración 9. Imágenes reclasificadas para la temporada Lluviosa

4.4. Modelación espacio-temporal

4.4.1. Cambio en la capacidad de recepción de aguas permanentes

Para los 33 años de análisis (1985-2018) se observaron cambio en la capacidad de recepción de aguas permanentes. En el periodo 1985-2001 la reducción de los espejos de agua fue de aproximadamente 867,19 hectáreas equivalentes a 8,38% del área total de los espejos de agua para el año 1985. Mientras que entre 2001 y 2018 la reducción de los espejos de agua fue de 3494,511 hectáreas, lo que corresponde a un registro porcentual de 32% con relación a la superficie total del espejo de agua en 2001.

En la ilustración 10 se aprecia la reducción de la superficie de los espejos de agua entre 1985-2018 (polígonos de color rojo), que representan aproximadamente 4361,701 hectáreas, es decir, el 41,72% de pérdida en el área del complejo respecto al año 1985. La zona de menor pérdida para la ciénaga se sitúa hacia el extremo occidental de la ciénaga (recuadro A, ilustración 11), debido a que en ella se encuentra la desembocadura de la Quebrada Quebradona; este tributante, el cual limita al sur con la unión a orillas de río Cauca y al este con microcuencas de la Escobilla, no presenta ninguna obra de control en su nacimiento el cual regule posibles aportes del Cauca a través de esta a la ciénaga. (Agroservicios, 1992)

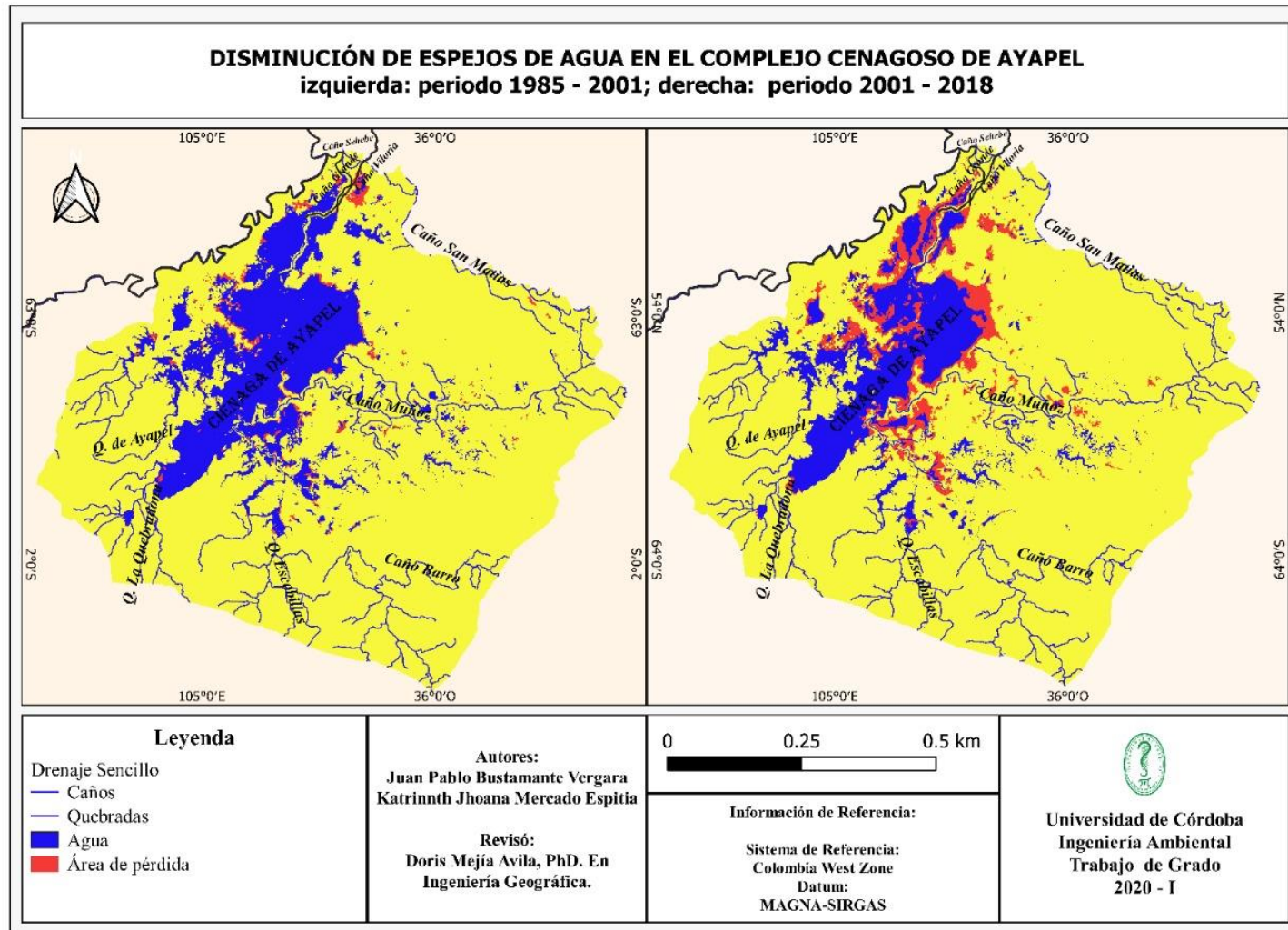


Ilustración 10. Disminución de espejos de agua en el complejo cenagoso de Ayapel. 1985-2018

Cabe resaltar, que la precipitación para la fecha de la imagen de febrero de 2018, fue mayor que la precipitación para las fechas de las otras dos imágenes de periodo seco, sin embargo, los espejos de agua en 2018 mostraron reducción con respecto a las demás fechas de comparación. En este sentido se puede afirmar que en los 33 años de análisis el complejo cenagoso de Ayapel ha venido disminuyendo su capacidad de recepción de aguas permanentes.

En el extremo sur oriental de la ciénaga (recuadro B, ilustración 11), se aprecia una reducción en los parches de espejos de agua que conforman el complejo; esta pérdida se relaciona a la presencia de obras de control en el río Cauca, diques Nuevo Mundo y Santa Anita (J. P. S. López, 2016), las cuales regulan el paso del recurso hídrico a cuencas como el caño Muñoz, quebrada Escobilla, y caño Barro; los cuales finalmente desembocan en la ciénaga de Ayapel. Los rompederos o diques de control según el abscisado general de dique realizado por la UNAL en Marzo del 2006, se encuentran ubicados hacia aproximadamente a 0.6 Km y 4.5 Km aguas abajo del corregimiento de Colorado respectivamente (DNP & UNAL, 2012); para el periodo 2012-2014 fueron remodelados, con el fin de reducir en gran medida los fenómenos de inundación por el proceso de trasvase de agua por parte del río Cauca en la zona (UNGRD, 2014).

Por tanto, de acuerdo a los resultados de reducción del humedal para el segundo periodo de interés (2001-2018) de aproximadamente 32% con respecto a el área ocupada por el complejo en 2001, se concluye que el aporte de aguas proveniente del río Cauca se encuentra reducido en los últimos años. Por tanto, se refleja una mayor pérdida en relación a los valores registrados para el año de 1985, con reducción del 41,72 % en sus espejos de agua.

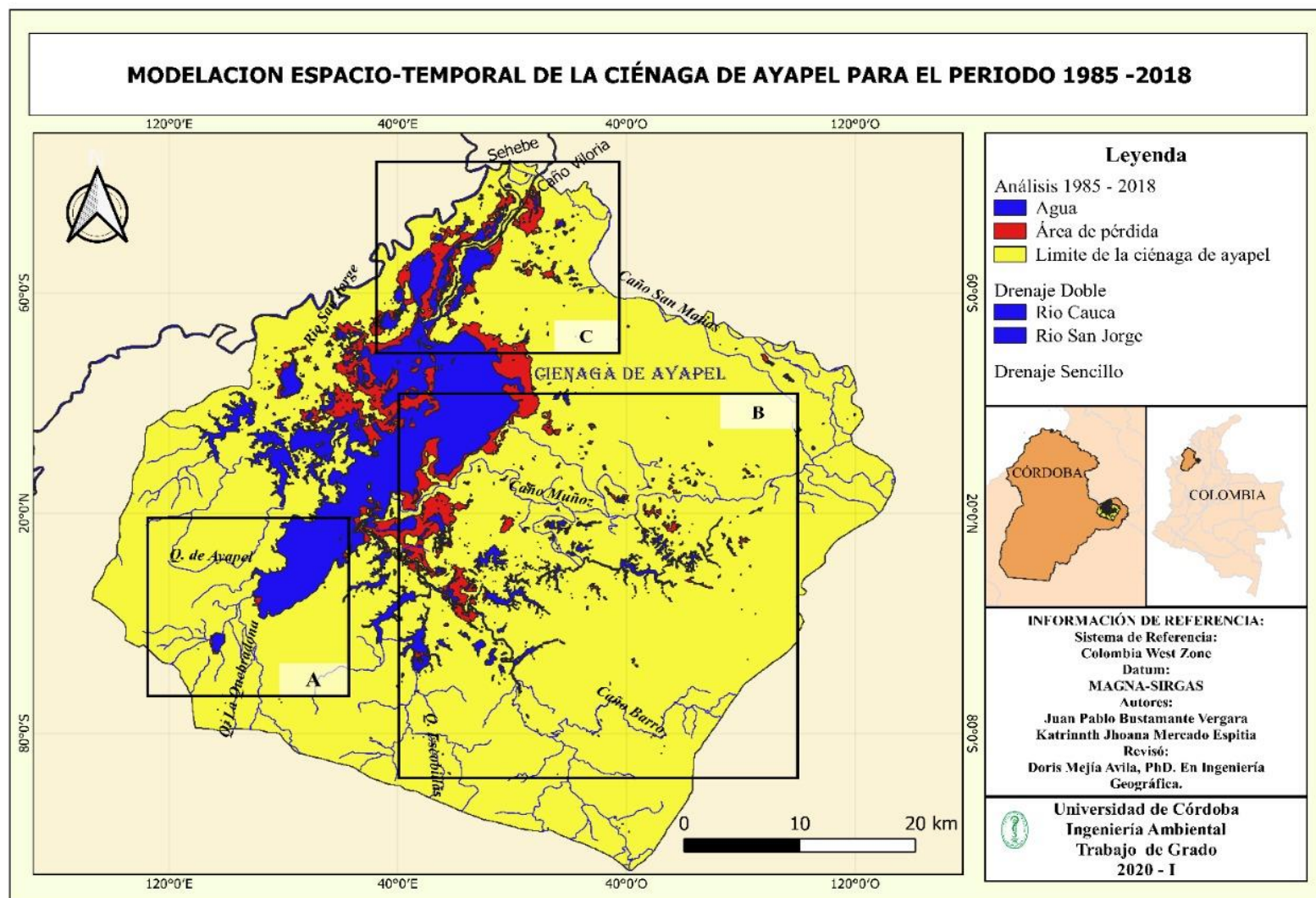


Ilustración 11. Modelación espacio temporal para el periodo 1985-2018

La reducción del área de los espejos de agua ubicadas en la zona nororiental del complejo de humedal de Ayapel (Recuadro c, ilustración 11), se debe al comportamiento del caño de conexión entre la ciénaga y el río San Jorge, el Sehebe. El comportamiento del caño el cual es bimodal (río-ciénaga-río) depende del nivel de los caudales en el San Jorge. Por tanto, considerando el régimen de lluvias del San Jorge, el cual es similar al presentado en la zona de ubicación del complejo cenagoso, el abastecimiento por parte del río al caño y posteriormente a la ciénaga desaparece entre los meses de diciembre a marzo, por ser los meses de menor precipitación; presentándose contribuciones por parte de la ciénaga al caño y posteriormente al río en este periodo.(C. D. I. A. CVS & Hidrogeocol, 2004)

Sin embargo, las precipitaciones en el lapso del mes de diciembre a febrero para el año 2018 fueron las más altas en comparación a las dos imágenes restantes de la temporada de análisis; apreciando una reducción en los espejos de agua para el periodo de 2018 con relación a las otras dos fechas de comparación. La reducción en la zona norte del complejo se sustenta por la presencia de un dique en la zona de confluencia del caño y el río, el cual regula el paso del agua entre estas cuencas en función de la prevención de fenómenos de inundación en poblaciones cercanas al punto de trasvase.(C. A. R. D. L. V. D. S. J. CVS & UNAL, 2011)

Según el informe de implementación de la segunda fase del plan de manejo de la ciénaga los caños Viloría y Grande, son los medios de abastecimiento de la región de la Mojana y el río San Jorge por parte de la ciénaga de Ayapel (ilustración 12) (ANP & CVS, 2010); los caudales de estos caños dependen del contenido de agua de la ciénaga, contenido que se encuentra definido por las cuencas tributantes hacia el complejo provenientes del Cauca. En este orden de ideas al presentarse periodos de baja precipitación, la zona del complejo de humedales de Ayapel recibe únicamente aportes provenientes del río Cauca los cuales se ven alterados por la manipulación de las obras de control, en este lapso de tiempo los niveles de recepción de aguas de la ciénaga se ven reducidos drásticamente. Por tanto, la zona norte en la cual se refleja la salida de agua del complejo cenagoso de Ayapel a través de los caños Viloría y Grande es apreciada una reducción considerable en el contenido de espejos de agua. (C. A. R. D. L. V. D. S. J. CVS & UNAL, 2011)

En la ilustración 12 puede apreciarse la zona norte del complejo por medio de la cual se presenta el drene de la ciénaga de Ayapel hacia el río y la región de la Mojana; y la reducción en el área de bifurcación del caño Grande y Vitoria, los cuales se encuentran ligados por los aportes de la ciénaga.

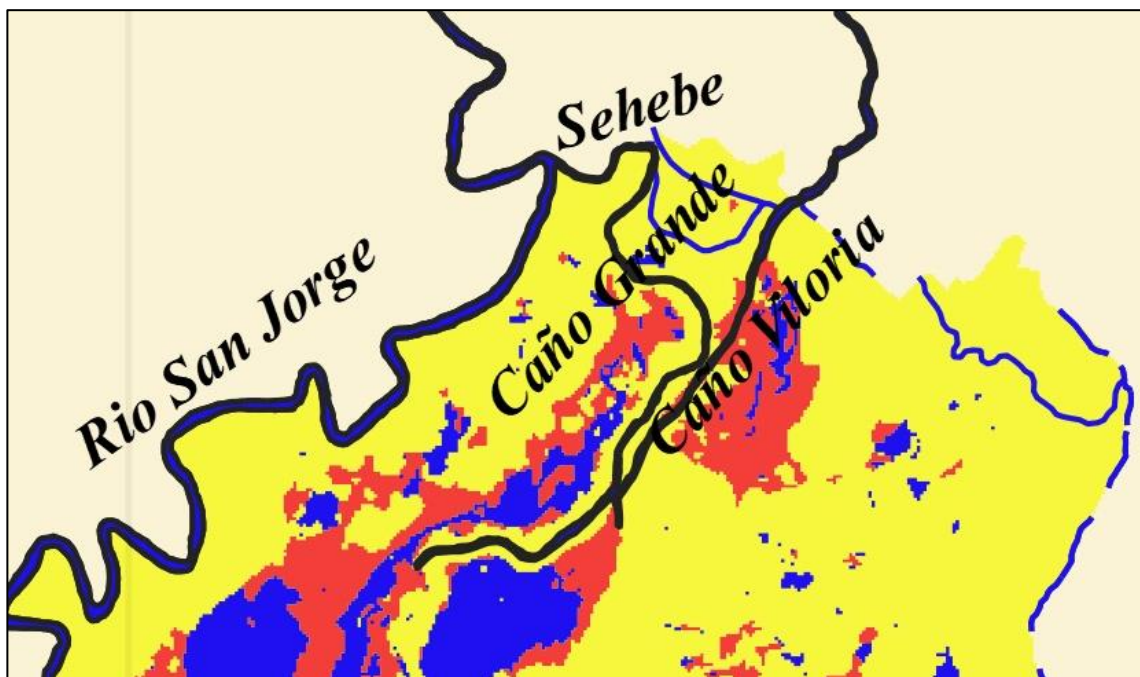


Ilustración 12. Zona norte de conexión río San Jorge- ciénaga de Ayapel. Temporada seca

La reducción de cuerpos de agua reflejada en el complejo de humedales de Ayapel a lo largo de los años estudiados (1985-2018), además de estar relacionada con la alteración en el ingreso de agua proveniente del río Cauca a través de los diques ubicados en el corregimiento de Nuevo Mundo y Santa Anita (Ilustración 13), se encuentra ligada al alto contenido de sedimentos en esta región (J. C. R. López et al., 2015), este aporte de sedimentos puede estar relacionado con el trasvase de aguas proveniente del río Cauca a lo largo de los años, favoreciendo el proceso de colmatación y reducción de la profundidad en el humedal. Los aportes de sedimentos por parte del Cauca están relacionados a actividades desarrolladas en la zona norte y media del río Cauca para la extracción de oro, la cual genera grandes problemáticas ambientales, dentro de las cuales se encuentran los

altos índices erosivos en zonas de extracción y consecuentemente el alto contenido de sedimentos a fuentes hídricas (Lopez, 1994).



Ilustración 13. Localización de obras de control, Río Cauca. Temporada seca.

Fuente: Google Earth

4.4.2. Fragmentación de la ciénaga

Dentro de los procesos de cambio en el área del humedal, en la tabla 9 se muestran las métricas de fragmentación presentada en el complejo cenagoso para el periodo de estudio interestacional (temporada seca).

IMAGEN	# de C. Agua	Tamaño Promedio de C. Agua	Grado de fragmentación
		$\left(\frac{\text{Área total de C. Agua}}{\# \text{ de C. Agua}} \right)$	$\left(\frac{\text{Área total de C. Agua}}{\text{Área total del Limite de la ciénaga}} \right)$
5 febrero 2001	1123	9.63 ha	0.163
20 febrero 2018	1287	5.93 ha	0.115

Tabla 9. Métricas de Fragmentación; **Fuente:** Elaboración Propia.

Entre el año 2001 y 2018 el complejo cenagoso ha sufrido un proceso de fragmentación aumentando su número de parches en un 14,6 % y reduciendo la superficie de parches en

un 61,57% como resultado de esto el grado de fragmentación con tendencia a 0 que indica el crecimiento de la insularización (Galvan et al 2015).

En la ilustración 14 en la cual se aprecia el cambio en la superficie de parches de agua; en el sector c, correspondiente al área de abastecimiento de la ciénaga por parte del río Cauca, el contenido de parches ha variado considerablemente entre los análisis obtenidos durante los 17 años de análisis (2001-2018). Esto se le atribuye a las obras situadas en el corregimiento de Santa Anita y Nuevo Mundo, para el control de caudales del río Cauca (J. P. S. López, 2016), cuya consecuencia es la reducción del caudal de las fuentes tributantes que surten la cuenca desde la parte sur oriental, tales como: caño Muñoz y caño Barro, debido a que para ciertos periodos de tiempo, se cierran los diques como medida de control para el mantenimiento de los caudales del río Cauca en periodos de estiaje promedio (C. A. R. D. L. V. D. S. J. CVS & UNAL, 2011). Estas obras de control son realizadas para adecuar las tierras, para desarrollo de actividades de carácter agropecuario tales como: ganadería y agricultura (C. D. I. A. CVS & Hidrogeocol, 2004). En la ilustración 13 se observa la localización de las estructuras de control

Para el sector B (ilustración 14), la fragmentación se asocia al aporte del flujo desde el caño Sehebe hacia el río San Jorge, por medio del caño Grande, considerando la presencia de obras de control en la zona de confluencia del caño con el río la cual regula los aportes provenientes del caño hacia el río, cuando los caudales en este son inferiores a los presentados en el caño y la ciénaga.

Considerando los aportes de agua provenientes del Cauca y el San Jorge, atribuidos a aumentos en las precipitaciones de la parte alta, se establece el paso de sedimentos producto de las actividades llevadas a cabo en las zonas alta y media de los ríos, relacionadas a actividades degradantes en las áreas en las cuales se llevan a cabo (C. D. I. A. CVS, 1990); por tanto, la fragmentación presentada en el sector B se asocia a procesos de sedimentación, afectando la capacidad de almacenamiento del complejo cenagoso y potenciando el grado de fragmentación, por aportes sedimentarios provenientes de sus tributantes, dado a que este sector se refiere al área por el cual la ciénaga cede sus aguas hacia el complejo de humedales de la Mojana a través del caño Viloría y la zona de conexión con el San Jorge por medio del Sehebe.

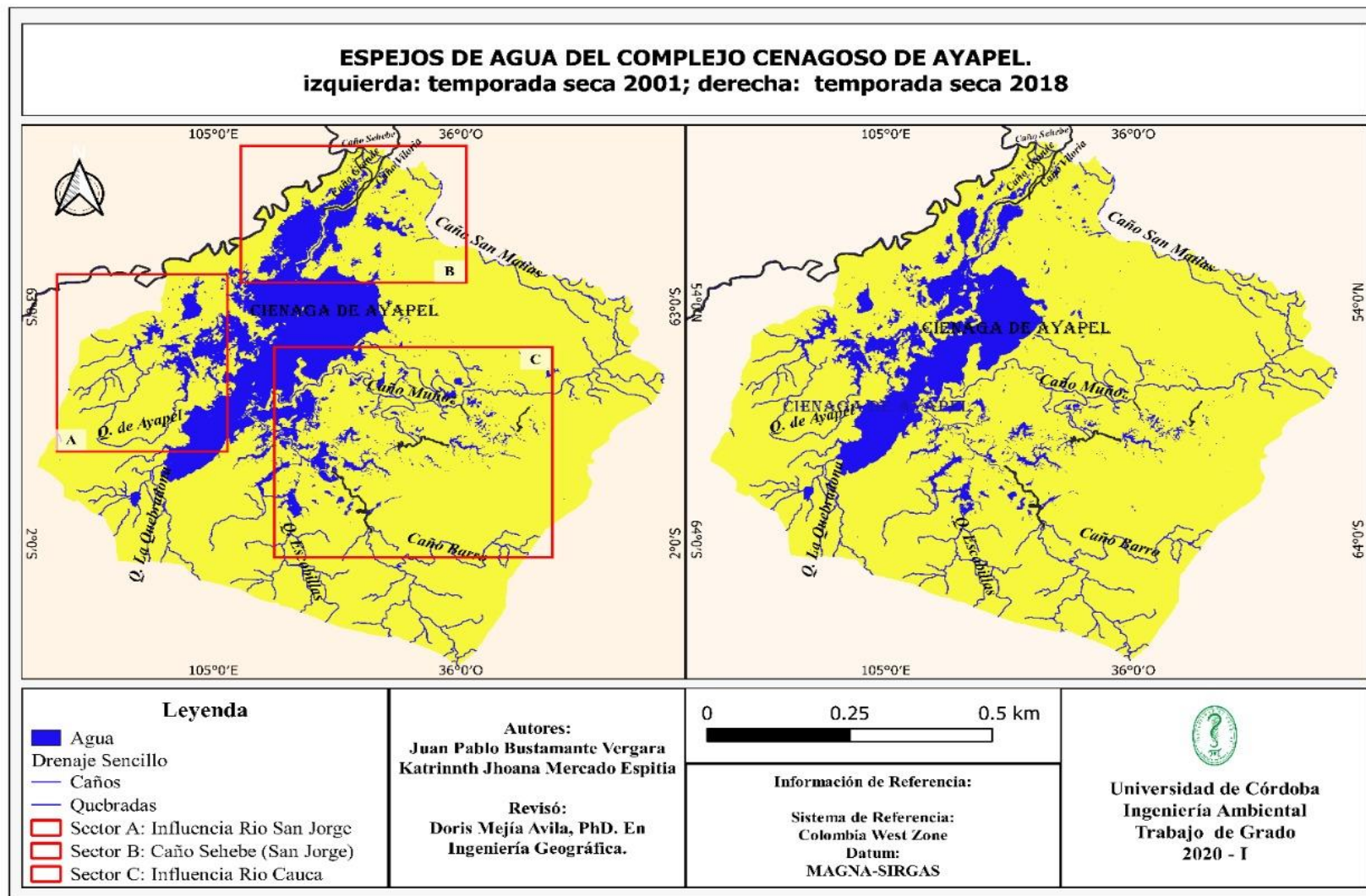


Ilustración 14. Espejos de agua en el complejo cenagoso de Ayapel. Temporada seca

Otra área de relación por el aporte del San Jorge a la ciénaga, sector en el cual se presenta variación en la presencia de polígonos que componen al humedal es la localizada en la zona nor-oeste del complejo (sector A, Ilustración 14). Donde se puede apreciar la notable división del cuerpo de agua, originando pequeñas zonas de almacenamiento en el área de reducción; relacionados a los aportes de agua provenientes de sus fuentes tributarias. Por tanto, dado el poco ingreso de agua en la ciénaga y la constante salida hacia la zona baja de la región de la Mojana en estos periodos, se consideran más las pérdidas en el complejo que aportes, los cuales sumados a procesos de colmatación en la ciénaga generan la división de los cuerpos de gran tamaño en el área del complejo.

En la actualidad se desarrollan actividades económicas que priman en la zona como la pesca, la ganadería, la agricultura y en general, producto del aprovechamiento de los recursos naturales. Estas generan sobre el ecosistema una presión constante, volviendo insostenible su desarrollo económico, social y ambiental. La transformación y pérdida es una problemática presentada de años recientes, donde las sociedades que habitan actualmente el sistema realizan acciones de manera directa e indirecta que afectan la dinámica natural y los recursos que oferta.

Todas estas actividades son agentes de cambio que influyen en el funcionamiento natural del ecosistema y se encuentran condicionadas a la época del año y los fenómenos de inundación (Colorado et al. 2002; Vélez 2014). Por ejemplo, la minería aurífera en la ciénaga de Ayapel es un fenómeno creciente que está modificando notablemente el paisaje, además de poner en riesgo los servicios ecosistémicos y la productividad del sistema, las actividades mineras originan condiciones ambientales extremas en los sistemas acuáticos porque tienden a producir altas concentraciones de metales pesados (Agudelo, 2017).

Los impactos negativos que más afectan al sistema y que se derivan de las actividades mencionadas anteriormente son la fragmentación del espejo de agua, la erosión, compactación del suelo, baja infiltración y aumento de la escorrentía, contaminación del agua superficial y subterránea por uso de productos químicos; disminución de las especies ícticas, la fauna en general; y alteración de hábitats y cadenas tróficas que tienen en situación de riesgo a más de una especie (Garzón y Gutiérrez 2013). Dentro de las cuales

los cambios en el uso de la tierra generan también impactos que evidencian la carga de sedimentos en los flujos hídricos y otros fenómenos físico-químicos relacionados. Los resultados de estos procesos son complejos y se reflejan mediante la división de los cuerpos de agua de gran y medio tamaño en el complejo afectando la fauna acuática y avícola de la zona.

4.4.3. Capacidad máxima de recepción de agua

El análisis de las imágenes de temporada húmeda para los tres periodos interanuales, evidencia que en el lapso de 29 años (1988-2017) el límite de agua se extiende, es decir, el complejo crece para esta temporada comparado con la fecha de referencia (1988). En 1988 los espejos de agua alcanzaban un área aproximada de 7859,06 hectáreas; para 2017 los espejos de agua alcanzaron 15992,934 hectáreas, es decir superaron la superficie inicial en 103,5%, equivalente al doble de la capacidad de la ciénaga en su periodo de referencia (1988).

En la ilustración 15 se observa que el mayor crecimiento ocurre hacia los sectores nor-occidental (entradas caño Viloría y Grande) y central (entrada de caño Barro, Muñoz y quebrada Escobilla); mientras que para la dirección sur-occidente (entrada de quebrada la Quebradona) se evidencia poco crecimiento. En la ilustración 15 se aprecia en color azul claro el aumento del espejo de agua para el periodo 1988-2017.

Para 1999 ya se evidencia el aumento de los espejos de agua en temporada lluviosa, como se puede observar en la ilustración 16. El aumento de estos espejos entre 1988 y 1999 fue de 3886,498 hectáreas, correspondientes al 49,45% con respecto al área original (1988).

Se puede afirmar que para los tres periodos interanuales analizados se conservan los patrones de crecimiento por sectores, a continuación, se detallan las posibles causas para cada sector.

Sector Nor-Occidental (entradas caño Viloría y caño Grande)

En este sector la entrada y/o salida de agua está asociada al río San Jorge y el complejo de humedales de la Mojana, a través del caño Sehebe y Viloría. El comportamiento de estos caños se centra en permitir el paso de agua hacia las zonas bajas por fuera del complejo de humedales, es decir, hacia el río San Jorge y la región de la Mojana.(C. A. R. D. L. V. D. S. J. CVS & UNAL, 2011) Sin embargo, al presentarse crecientes en el río San Jorge y el sector de la Mojana por aumento de lluvias en las zonas altas al complejo de humedal; por tanto, menores niveles de agua para la ciénaga y mayores para el sector de la Mojana y el río San Jorge, estos caños actúan como cuencas tributantes de la ciénaga, presentando el fenómeno de remanso.

En este sector, el aumento de los espejos de agua fue significativo para la temporada 1988-1999, mientras que para el periodo 1999-2017 fue menor como se observa en la ilustración 16.

Sector central (entrada al caño Barro)

En este sector se evidencia crecimiento significativo de los espejos de agua en la temporada húmeda; el mayor incremento se observó para el periodo 1999-2017 (Ilustración 16 b).

El aumento en este sector se relaciona con el abastecimiento a la ciénaga por parte del río Cauca cuando sus caudales se encuentran por encima del promedio, surtiendo el complejo mediante la quebrada Escobilla y los caños Barro y Muñoz (ANP & CVS, 2010).

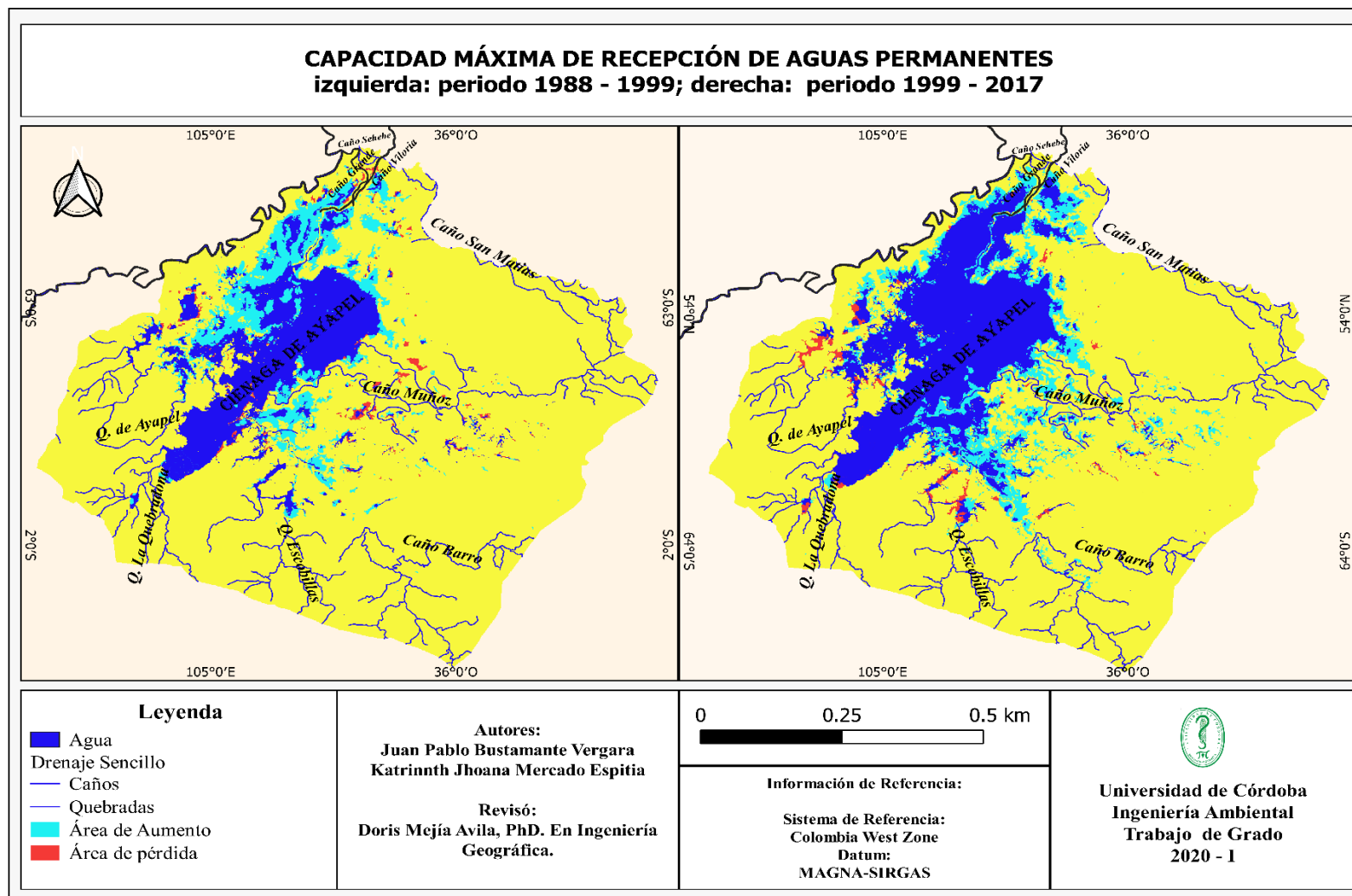


Ilustración 16. Capacidad máxima de recepción de aguas permanentes: a) periodo 1988-1999 b) periodo 1999-2017.

El área de abastecimiento del Cauca, si bien se encuentra regulada por la presencia de estructuras de control de caudal; estas influyen en la dinámica hídrica del humedal, por lo tanto, el aumento de las zonas inundables se relaciona a la generación de nuevas zonas de inundación que anteriormente no lo eran, influenciadas por procesos de sedimentación presentados en el humedal, es decir, al perder profundidad las zonas anteriormente inundables, el agua se redirigirá a nuevas áreas de mayor profundidad en la cual se almacenará. Sin embargo, los considerables aumentos para las fechas establecidas pueden verse asociadas a fenómenos de desborde en los rompederos, debido a los altos caudales por parte del río Cauca producto de altas precipitaciones en la zona alta, hacia el interior del país.

No obstante, para el año 2017 se presentó un desborde por parte del río Cauca, en el cual abrió una boca en un sector de la finca Santillana bajo jurisdicción del municipio de Nechí-Antioquia, este llevado a cabo para el año 2017 sustenta el aumento considerable en el sector, dado que la nueva área de abastecimiento se originó para mediados del mes de mayo y se encuentra en cercanías del caño Barro.(Panorama, 2017)

Sector Sur-Occidente (entrada de la quebrada Quebradona)

Este sector muestra a través de los tres años analizados un comportamiento estable, con un crecimiento que tiende a cero, comportamiento atribuido a la topografía del área, dado que esta zona colinda con sistemas montañosos, por cercanías con las cordilleras del departamento de Antioquia, por tanto, al ser la zona de la desembocadura una de las más bajas en la ciénaga, con mayor profundidad. El factor pendiente no favorece crecimiento considerable hacia la zona sur-occidente del complejo en periodos de alta pluviosidad.

De acuerdo a los resultados expuestos, se concluye que el ecosistema cenagosos ha sufrido un proceso de colmatación, debido a la deforestación de los sectores altos de las cuencas tributarias al complejo, como son la cuenca del río San Jorge y la del río Cauca (C. A. R. D. L. V. D. S. J. CVS, 2005). Esto se relaciona con la presencia de fenómenos de inundación para las comunidades aledañas a la ciénaga, con aumento a lo largo de los años. Además de pérdidas económicas en el sector agrícola, dado que en épocas de reducción del cuerpo de agua las zonas al borde son utilizadas para producción de cosechas como arroz, yuca, maíz, entre otros.(C. D. I. A. CVS & Hidrogeocol, 2004)

CONCLUSIÓN

A través de imágenes del satélite Landsat, se modelaron los cambios espaciales del complejo cenagosos de Ayapel a través de los 33 años, teniendo en cuenta las temporadas; seca y lluviosa respectivamente. La consideración de diferentes métodos de cartografiado del agua permitió la clasificación del componente agua, permitiendo establecer una cronología de cambio en el área que influyo en la determinación de las posibles causas de su variación.

La reducción y fragmentación de los espejos de agua en época seca permitió concluir que el complejo cenagoso de Ayapel ha perdido la capacidad de recepción de aguas permanentes. Igualmente, el aumento de la superficie de los espejos de agua en época lluviosa a través del tiempo, hace evidente la pérdida de capacidad de desagüe de los excesos de agua en esta temporada, lo que desenlaza en potencial riesgo para las comunidades cercanas al complejo.

La modificación de las cuencas altas de los ríos aportantes al complejo ha determinado el aumento en los aportes de sedimentos y su consecuente colmatación; sumado a lo anterior a nivel local, la construcción de obras de control de inundaciones en los ríos Cauca y San Jorge e igualmente la construcción de diques al interior del complejo con fines de adecuación de tierras para las actividades agropecuarias ha determinado el cambio de la dinámica hidrológica del complejo.

Los cambios de la dinámica hidrológica natural del complejo ocasionan desequilibrios ecológicos que influyen en la pérdida de diversidad de flora y demás recursos hidrobiológicos, que determinan impactos negativos para la fauna y flora y las actividades económicas asociadas a la extracción de recursos del complejo.

RECOMENDACIONES

Se utilizaron productos Landsat, porque a la fecha son los que presentan repositorios más antiguos de imágenes. Sin embargo, los procesos de cartografiado en la obtención de cambios pueden ser mejorados mediante el uso de imágenes de mayor resolución para el establecimiento de resultados más veraces en el comportamiento del cuerpo de agua en amplios lapsos de tiempo. Por lo tanto, se recomienda utilizar los resultados obtenidos como una base de orientación, y continuar el monitoreo con otros productos que permitan mayor resolución.

Se recomienda la ampliación de usos de índices que permitan resaltar cuerpos de agua de los demás atributos, con el fin de mejorar los rangos de delimitación de cuerpos de agua y reducir posibles pérdidas de información en el proceso.

Se recomienda hacer una verificación de campo para precisar otras obras de ingeniería que estén impactando a la ciénaga.

Los resultados se contrastaron con información bibliográfica y estudios específicos del complejo cenagoso de Ayapel, se recomienda profundizar en el estudio de efectos ambientales ocasionados por la reducción de la superficie inundable del complejo

BIBLIOGRAFÍA

- Agroservicios, LTDA. (1992). *Diagnóstico Básico De La Cuenca Hidrográfica De La Quebrada Quebradona; Municipio De Ayapel, Departamento De Córdoba.* Corporación Autónoma De Los Valles Del Sinú Y San Jorge.
- Agudelo, A. M. Z. (2017). *Diagnóstico Ambiental De La Ciénaga De Ayapel A Través De La Variación Temporal De Los Aspectos Morfo Funcionales Del Fitoplancton Y Un Indicador De Calidad Ecológica.* 102.
- ANP, Á. N. P., & CVS, C., Corporación Autónoma Regional De Los Valles Del San Jorge. (2010). *Implementación II Fase Del Plan De Manejo Del Complejo De Humedales De Ayapel, 2009* (Convenio No.024-009 CVS-Corporación ANP; Implementación De Los Planes De Manejo CCBS. Y CH. Ayapel).
- Antelo, M. R., & Long, M. E. F. (2014). *Estimación De Datos Faltantes De Precipitación Diaria Para Las Distintas Ecorregiones De La República Argentina.* <https://www.ina.gov.ar/legacy/ifrh-2014/eje3/3.02.pdf>
- Araujo, B. S. (2006). Clasificación Supervisada Y No Supervisada. *Advanced Tech Computing Group UTPL.* <https://advancedtech.wordpress.com/2008/04/14/clasificacion-supervisada-y-no-supervisada/>
- Ávila, D. M., Barrera, V. C. S., & Lara, Z. M. (2019). *Spatio-Temporal Modelling of Wetland Ecosystems Using Landsat Time Series: Case of The Bajo Sinú Wetlands Complex (BSWC)– Córdoba– Colombia.* <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/19475683.2019.1617347>

- Bacon, P. R. (2016). *La Función De Los Humedales En El Ciclo Hidrológico*.
<https://www.ramsar.org/sites/default/files/documents/cop7-docs/non-resrecs%20final/cop7%2016.1s.pdf>
- Behera, M. D., Chitale, V. S., Shaw, A., Roy, P. S., & Murthy, M. S. R. (2012). Wetland Monitoring, Serving as an Index of Land Use Change-A Study in Samaspur Wetlands, Uttar Pradesh, India. *Journal of The Indian Society of Remote Sensing*, 40(2), 287-297. <https://doi.org/10.1007/s12524-011-0139-6>
- Caribe, F. H. A., & CVS, C. A. R. De Los V. Del S. Y Del S. J. (2015). *Determinantes Ambientales Para Los Municipios De Ayapel, Pueblo Nuevo Y Planeta Rica - Departamento De Córdoba*. Físico.
- Chander, G. C., Markham, B. L., & Helder, D. L. (2009). Summary of Current Radiometric Calibration Coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, And EO-1 ALI Sensors. *Remote Sensing of Environment*, 113(5), 893-903. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2009.01.007>
- CONAE. (2016). *Índices Espectrales Derivados De Imágenes Satelitales Landsat 8 Sensor OLI*.
<https://catalogos.conae.gov.ar/landsat8/docs/indicesespectralesderivadosdelandsat8.pdf>
- Conly, F. M., & Van Der Kamp, G. (2001). Monitoring The Hydrology of Canadian Prairie Wetlands to Detect the Effects of Climate Change and Land Use Changes. *Environmental Monitoring And Assessment*, 67(1), 195-215. <https://doi.org/10.1023/A:1006486607040>
- Custodio, E. (2001). *Aguas Subterráneas Y Medio Ambiente*.
<http://biblioteca.cehum.org/bitstream/123456789/941/1/Bernues%2C%20Tora>

- CVS, C. A. R. D. L. V. D. S. J. (2005). *Valoración Económica Y Ecológica Del Humedal De Ayapel—Departamento De Córdoba* (Tomo II) [Informe Final].
- CVS, C. A. R. D. L. V. D. S. J., & UNAL, U. N. D. C. (2011). *Obras Para El Control De Desborde Del Caño Sehebe, Municipio De Ayapel, Departamento De Córdoba*. Universidad Nacional De Colombia.
- CVS, C. D. I. A. (1990). *Estudio De Impacto Ambiental Por Minería En La Ciénaga De Ayapel*.
- CVS, C. D. I. A., & Consultores, U. T. (2007). *Elaboración Del Inventario, Diagnostico Y Estudio De Ingeniería Para La Formulación De Los Planes De Restauración, Recuperación, Compensación Y Abandono De Los Sitios De Disposición Final Inadecuados O Botaderos A Cielo Abierto Para Los Municipios De Córdoba*. (Diagnóstico N.º 2).
- CVS, C. D. I. A., & Hidrogeocol. (2004). *Estudio Hidrogeológico En La Zona De Influencia De La Ciénaga De Ayapel Que Permita Definir La Relación Hidráulica Existente Dentro La Ciénaga Y Los Acuíferos Asociados* [Final].
- Díaz, M. M. A. (2009). *Ciénaga De Ayapel: Riqueza En Biodiversidad Y Recursos Hídricos*. Banco De La Republica; N° 112. [Http://Www.Banrep.Gov.Co/Sites/Default/Files/Publicaciones/Archivos/DTSER-112.Pdf](http://Www.Banrep.Gov.Co/Sites/Default/Files/Publicaciones/Archivos/DTSER-112.Pdf)
- Díaz, M. M. A. (2011). *La Economía De Las Ciénagas Del Caribe Colombiano*. Ladiprint Editorial S.A.S.

https://www.banrep.gov.co/docum/Lectura_Finanzas/Pdf/Lbr_Economia_Cienagas.Pdf

DNP, D. N. De P., & UNAL, U. N. D. C. (2012). *Estudios, Análisis Y Recomendaciones Para El Ordenamiento Ambiental Y El Desarrollo Territorial De La Mojana* (Convenio Interadministrativo Volumen 2; Evaluación Dique Marginal).

http://www.planesmojana.com/documentos/Estudios/Informe%20Unal/Vol2_Evaluaci%C3%B3n%20Dique%20Marginal_Vfinal_23abr2012.Pdf

Franzpc. (2012, mayo 10). *Clasificación Supervisada Y No Supervisada En Arcgis*. El Blog De Franz. <https://acolita.com/Clasificacion-Supervisada-No-Supervisada-En-Arcgis/>

Gao, Y., Liang, Z., Wang, B., Wu, Y., & Wu, P. (2018). *Wetland Change Detection Using Cross-Fused-Based and Normalized Difference Index Analysis On Multitemporal Landsat*

8

OLI.

<https://ezproxyucor.unicordoba.edu.co:2113/docview/2049500073/63F801737824C6APQ/1?Accountid=137088>

Gleason, C. J., Wada, Y., & Wang, J. (2018). A Hybrid of Optical Remote Sensing and Hydrological Modeling Improves Water Balance Estimation. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 10(1), 2-17. <https://doi.org/10.1002/2017MS000986>

Henao, S. H. (2015). *Indicadores De Calidad Ambiental De Humedales*. <http://repositorio.ucm.edu.co:8080/jspui/bitstream/Handle/10839/1136/Santiago%20Hernandez%20Henao.Pdf?Sequence=1&Isallowed=Y>

IDEAM, I. De H., Meteorología y Estudios Ambientales. (2019). *Solicitud De Información - IDEAM*. <http://www.ideam.gov.co/Solicitud-De-Informacion>

- Jing, X., Huang, Y., Lou, G., & Bao, Y. (2018). Analysis of Wetland Dynamic Change and Ecological Health in Wuliangsu Hai Based on Multi-Temporal Remote Sensing Image. *2018 Fifth International Workshop On Earth Observation and Remote Sensing Applications (EORSA)*, 1-5. <https://doi.org/10.1109/EORSA.2018.8598606>
- Kashaigili, J. J., Mbilinyi, B. P., McCartney, M., & Mwanuzi, F. L. (2006). Dynamics of Usangu Plains Wetlands: Use of Remote Sensing and GIS as Management Decision Tools. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 31(15-16), 967-975. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2006.08.007>
- Lefeuvre, J.-C., Laffaille, P., Feunteun, E., Bouchard, V., & Radureau, A. (2003). Biodiversity in Salt Marshes: From Patrimonial Value to Ecosystem Functioning. The Case Study of the Mont-Saint-Michel Bay. *Comptes Rendus Biologies*, 326, 125-131. [https://doi.org/10.1016/S1631-0691\(03\)00049-0](https://doi.org/10.1016/S1631-0691(03)00049-0)
- Li, W., Du, Z., Ling, F., Zhou, D., Wang, H., Gui, Y., Sun, B., & Zhang, X. (2013). A Comparison of Land Surface Water Mapping Using the Normalized Difference Water Index from TM, ETM+ And ALI - Proquest. <https://ezproxyucor.unicordoba.edu.co:2113/docview/1537354773/1415D79230154B77PQ/1?Accountid=137088>
- Londoño, J. C. J., & Ramírez, N. J. A. (2012). Cambios Espacio-Temporales Del Plancton en la Ciénaga De Ayapel (Córdoba-Colombia), Durante la Época de Menor Nivel del Agua - Proquest. <https://ezproxyucor.unicordoba.edu.co:2113/docview/1677410263/89EB00F227634070PQ/1?Accountid=137088>

- López, J. C. R., Royero, J. C. O., Díaz, L. O., & Ortiz, S. R. O. (2015). Transporte de Sedimentos en Suspensión en los Principales Ríos del Caribe Colombiano: Magnitud, Tendencias y Variabilidad. *Revista de La Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 39(153), 527. <https://doi.org/10.18257/Raccefyn.209>
- López, J. P. S. (2016). *Modelación del Comportamiento Hidrosocial De La Ciénaga de Ayapel (Córdoba) Bajo Diferentes Escenarios De Cambio Climático*. 114.
- LOPEZ, M. A. B. (1994). *Minería En El Cauca "Compendio De Estudios Realizados en las Zonas Mineralizadas del Cauca Conclusiones y Recomendaciones*.
- Martínez, A. A. A., Rodríguez, J. M., Hernández, A. C., Martínez, A. A. A., Rodríguez, J. M., & Hernández, A. C. (2014). Los Paisajes De Humedales, Marco Conceptual y Aspectos Metodológicos Para Su Estudio y Ordenamiento. *Mercator (Fortaleza)*, 13(2), 169-191. <https://doi.org/10.4215/RM2014.1302.0012>
- Mcfeters, S. K. (1996). The Use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) In The Delineation of Open Water Features. *International Journal of Remote Sensing*, 17(7), 1425-1432. <https://doi.org/10.1080/01431169608948714>
- Montoya M, Y., & Aguirre R, N. (2009). Cambios Nictemerales de Variables Físicas y Químicas en la Ciénaga de Paticos, Complejo Cenagoso de Ayapel, Colombia. *Revista De Biología Tropical*, 57(3), 635-646.
- Muñoz, J. C. J., Sobrino, J. A., & Sòria, G. (2010). *Universidad De Valencia – Parque Científico Laboratorio De Procesado De Imágenes (LPI)*. 12.
- Panorama. (2017, mayo 13). Desbordamiento Del Río Cauca Tiene En Alerta A Ayapel. *Panorama Del San Jorge*.

- <https://www.panoramadelsanjorge.com.co/actualidad/posible-desbordamiento-del-rio-cauca-tiene-en-alerta-a-ayapel/>
- Parra, L. T. G. (2018). Análisis Multitemporal del Humedal la Conejera “Sector: Suba Compartir”. *Boletín Semillas Ambientales*, 12(2), 32-38.
- Ramsar, S. De La C. De. (2006). *Manual De La Convención De Ramsar*, 4a. Edición. https://www.ramsar.org/sites/default/files/documents/pdf/lib/lib_manual2006s.pdf
- Reuter, F. (2008). *Procesamiento Digital de Imágenes*. <https://fcf.unse.edu.ar/archivos/lpr/pdf/p9.pdf>
- Rodríguez, C. (2018). *¿Qué Es El Contraste y Cómo Puedo Aprovecharlo en mis Fotos?* <https://www.alphauniverse-latin.com/notas/que-es-el-contraste-y-como-puedo-aprovecharlo-en-mis-fotos>
- Rodríguez, M. V. (2016). *Qué Son Los Humedales y Para Qué Sirven (Y Algunos Ejemplos Para Que Visites en España)*. <https://www.diariodelviajero.com/espana/que-son-los-humedales-y-para-que-sirven-y-algunos-ejemplos-para-que-visites-en-espana>
- Roldán, L. F. (2019). *Aguas Continentales: Qué Son, Características e Importancia*. Ecologiaverde.Com. <https://www.ecologiaverde.com/aguas-continenciales-que-son-caracteristicas-e-importancia-2363.html>
- UNGRD, U. N. Para La G. Del Riesgo De D. (2014). *Entregan Obras de Cierre de Rompederos Santa Anita y Nuevo Mundo, en el Departamento de Antioquia*. <http://portal.gestiondelriesgo.gov.co/paginas/noticias/2014/entregan-obras-de-cierre-de-rompederos-santa-anita-y-nuevo-mundo,-en-el-departamento-de-antioquia.aspx>

- USAID, D. De D. R. Y M. A. Con Apoyo De La O. De A. Para D. En El E. De La A. De Los E. U. Para El D. I. (1993). *Capítulo 8. Definición de Llanura de Inundación Y Evaluación del Peligro de Inundaciones*.
<https://www.oas.org/usde/publications/unit/Oea65s/Ch13.htm>
- USGS. (2014). *El Servicio Geológico de los Estados Unidos—USGS*.
<https://earthexplorer.usgs.gov/>
- Vidal, L. F., Delgado, J., & Andrade, G. I. (2013). Factores de la Vulnerabilidad de los Humedales Altoandinos de Colombia al Cambio Climático Global. *Cuadernos de Geografía*, Vol. 22, 17.